

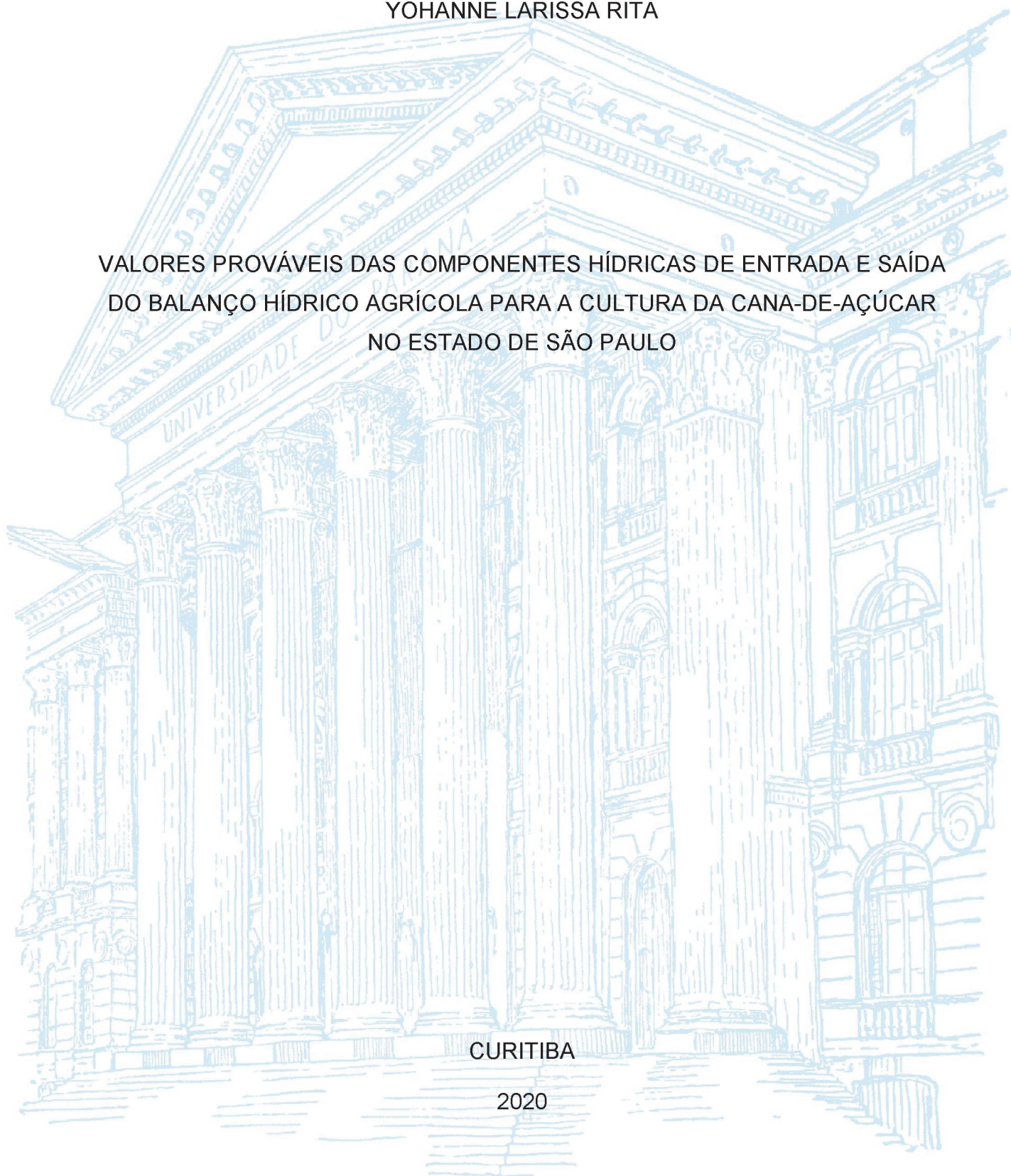
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

YOHANNE LARISSA RITA

VALORES PROVÁVEIS DAS COMPONENTES HÍDRICAS DE ENTRADA E SAÍDA  
DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR  
NO ESTADO DE SÃO PAULO

CURITIBA

2020



YOHANNE LARISSA RITA

VALORES PROVÁVEIS DAS COMPONENTES HÍDRICAS DE ENTRADA E SAÍDA  
DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR  
NO ESTADO DE SÃO PAULO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza  
Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier

CURITIBA

2020



## FICHA CATALOGRÁFICA

Rita, Yohanne Larissa

Valores prováveis das componentes hídricas de entrada e saída do balanço hídrico agrícola para a cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. / Yohanne Larissa Rita. - Curitiba, 2020.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Orientador: Jorge Luiz Moretti de Souza.

Coorientador: Alexandre Cândido Xavier.

1. Precipitação (Meteorologia). 2. Evapotranspiração. 3. Balanço hidrológico. 4. Aquicultura. 5. Cana-de-açúcar. I. Souza, Jorge Luiz Moretti de. II. Xavier, Alexandre Cândido. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **YOHANNE LARISSA RITA** intitulada: **VALORES PROVÁVEIS DAS COMPONENTES HÍDRICAS DE ENTRADA E SAÍDA DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO**, sob orientação do Prof. Dr. JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 25 de Junho de 2020.

Assinatura Eletrônica

25/06/2020 18:34:32.0

JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

25/06/2020 18:33:37.0

ANDRÉ CARLOS AULER

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

25/06/2020 18:36:58.0

LUIZ RICARDO SOBENKO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TUIUTI DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

25/06/2020 18:34:49.0

ALEXANDRE CÂNDIDO XAVIER

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO)

Esta dissertação é inteiramente dedicada aos meus pais, Alfredo e Solange, os maiores incentivadores aos estudos e as realizações dos meus sonhos.

A vocês, com amor!



## AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus por ter me aberto os caminhos e me guiado com proteção e benevolência;
- Aos meus pais, Alfredo e Solange, pelo privilégio do estudo. Por me incentivarem e me proporcionarem uma vida digna, com todas as necessidades sanadas e, principalmente, por todo amor recebido e ensinado;
- Às minhas irmãs, Marúbia e Natyele, pela ajuda em todos os momentos de estudo, sendo psicólogas caseiras, me orientando e apoiando sempre;
- À minha sobrinha Amanayara por me impulsionar a ser um bom exemplo, sempre me dedicando mais aos meus estudos e sonhos;
- To Dominic Evans for all the support, belief, trust and love that I received in the most difficult part of this Master's;
- À minha família de Curitiba por estarem presente durante todo o processo e por me apoiarem incondicionalmente;
- À Josiane C. Panisson pelos conselhos, sabedoria compartilhada, desabafos, apoio e amizade de longa data;
- À Victoria H. S. Correa pelos risos, choros, apoio e tornar a jornada mais leve com um lar com muito amor;
- À Jéssica Lima Viana por todos os conselhos, momentos partilhados, ajuda e carinho;
- Às amigas, Bruna Matos, Cassiano Tressoldi, Cristiane Voges, Fernanda Bueno e Tatiana Martins, que mesmo distantes fisicamente estiveram torcendo por mim;
- Às amigas feitas durante o mestrado, principalmente Larissa e Lenir pelos conselhos e desabafos e “República Pingaiada Original”, pelo apoio e bons momentos partilhados;
- Aos amigos Antônio Augusto Alves Pereira e Marcelo Gomes, vocês são um exemplo a seguir;
- Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade em cursar o mestrado e realizar esta dissertação;
- Ao Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, que compartilhou seu conhecimento e ensinamentos com sugestões e críticas, conselhos, pela oportunidade e por acreditar em mim;
- Ao Prof. Dr. Alexandre Xavier por conceder os dados;
- Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro e concessão de bolsa de estudos durante um ano;
- Ao ELAP (Emerging Leaders in the Americas Program) pela oportunidade e premiação recebida, possibilitando a participação como pesquisadora visitante em período integral no Canadá, muito aprendizado, novos conhecimentos e cultura;
- Ao Global Affairs Canada International Scholarships Program and the Department of Foreign Affairs, Trade and Development (DFATD) pelo apoio financeiro e concessão de bolsa de pesquisa;
- À University of Saskatchewan e International Student and Study Abroad Centre por oportunizar e aceitar uma pesquisadora internacional em seu Grad. Studies;
- Ao Global Institute for Water Security pela oportunidade e estrutura proporcionada junto ao Innovation Centre;
- To Prof. Ph.D. Simon Michael Papalexiou for sharing his knowledge and giving me the opportunity to learn and live new lessons and culture with politeness and respect as well as seeing the scientific world from a different perspective;
- To SMPLab members for all the support and friendship, specially to Benedetta Moccia.

## RESUMO

Teve-se como objetivo no presente estudo determinar os valores prováveis da precipitação pluviométrica ( $P$ ) e evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), bem como das componentes de saída do balanço hídrico agrícola ( $BHA$ ) para a cultura da cana-de-açúcar, para um *grid* regular  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  em todo Estado de São Paulo. A dissertação foi estruturada em capítulos, sendo: Capítulo I – Referencial teórico; Capítulo II – Precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência prováveis no Estado de São Paulo; e, Capítulo III – Balanço hídrico agrícola provável para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. As análises foram realizadas no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA)/ SCA / UFPR. Foram utilizados dados climáticos de 36 anos, do período de 01 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro 2015, interpolados de valores diários medidos em estações meteorológicas convencionais e automáticas. Os dados meteorológicos espacializados utilizados são de *grid* regular  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  constituído para o Estado de São Paulo. Os cálculos dos valores prováveis e o teste de aderência às funções de densidade probabilidade (*fdp's*) foram realizados com o Módulo “Distribuição de frequência, teste de aderência e cálculo de valores prováveis”. O cálculo do  $BHA$  para a cultura da cana-de-açúcar foi realizado com o modelo água-cultura AquaCrop, versão 6.1, disponibilizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO). Com as *fdp's* (Exponencial, Gama, Normal, Uniforme e Triangular) que melhor se ajustaram a  $ET_o$ ,  $P$ ,  $ET_c$ ,  $Arm$ ,  $ET_r$ ,  $Def$  e  $Exc$  em cada decêndio, foram determinados os valores decendiais prováveis de  $Arm$  e  $P$  a 75% de probabilidade ( $Arm_{75\%}$  e  $P_{75\%}$ ), e  $Def$ ,  $ET_c$ ,  $ET_o$ ,  $ET_r$  e  $Exc$  a 25% de probabilidade ( $Def_{25\%}$ ,  $ET_{c25\%}$ ,  $ET_{o25\%}$ ,  $ET_{r25\%}$  e  $Exc_{25\%}$ ). Foram gerados mapas de  $ET_{o25\%}$ ,  $P_{75\%}$ ,  $ET_{c25\%}$ ,  $Arm_{75\%}$ ,  $ET_{r25\%}$ ,  $Def_{25\%}$  e  $Exc_{25\%}$  com o programa RStudio 4.0. A *fdp* Gama apresentou melhor ajuste aos valores decendiais de  $P$ ,  $ET_c$ ,  $ET_r$ ,  $Def$  e  $Exc$ , e a *fdp* Normal apresentou melhor ajuste aos valores decendiais de  $ET_o$  e  $Arm$ . A  $P_{75\%}$  é bem definida no Estado de São Paulo, sendo superior no verão (20 a 53 mm decêndio<sup>-1</sup>) e primavera-verão (15 a 39 mm decêndio<sup>-1</sup>). A região litorânea (sul e sudeste) tem as maiores probabilidades de chuva ao longo do ano, com exceção do inverno. O inverno (0 a 15 mm decêndio<sup>-1</sup>) tem maior probabilidade de ausência de precipitação ( $P_0 = 0$ ). A  $ET_{o25\%}$  é mais alta na primavera no Estado de São Paulo (38 a 52 mm decêndio<sup>-1</sup>), caindo no outono-inverno (25 a 40 mm decêndio<sup>-1</sup>). As maiores probabilidades de  $ET_{o25\%}$  encontra-se nas regiões norte e noroeste. Espera-se valores de  $ET_{c25\%}$  inferiores a 10 mm decêndio<sup>-1</sup> no inverno e de até 36 mm decêndio<sup>-1</sup> no verão. Espera-se  $Arm_{75\%}$  de até 70 mm no verão, e valores de até 120 mm nas demais estações. Espera-se valores superiores de  $Exc_{25\%}$  durante o verão, com maior probabilidade de sua ausência ( $Exc = 0$ ) durante inverno nas regiões de Araçatuba, Araraquara, São José do Rio Preto, Ribeirão Preto e Piracicaba. De modo geral, a primavera é um período favorável para o cultivo da cana-de-açúcar nas principais regiões do Estado de São Paulo. O verão é o período em que se espera o maior consumo de água pela cultura ao longo do ciclo, que pode ser prejudicada pela falta de água disponível. O  $Arm_{75\%}$  no inverno é muito baixo nas regiões de Araçatuba e Araraquara, sendo que os resultados obtidos demonstram que a cultura sofrerá com a baixa disponibilidade hídrica no período.

Palavras chave: Componentes hídricas. Relações hídricas. AquaCrop. Modelagem. Função densidade probabilidade. Valores prováveis.



## ABSTRACT

The aim of this study was to determine the probable ten-day values of rainfall ( $P$ ) and reference evapotranspiration ( $ET_o$ ), as well as the components of the output of the agricultural water balance ( $AWB$ ) for sugarcane crop, for a regular  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  grid throughout São Paulo State. The study was divided in chapters, being: Chapter I – Theoretical reference; Chapter II – Probable rainfall and reference evapotranspiration in São Paulo State; and, Chapter III – Probable agricultural water balance for sugarcane in São Paulo State. This research was carried out at the Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas/ SCA / UFPR. Climatic data of 36 years, from January 1<sup>st</sup>, 1980 to December 31<sup>st</sup>, 2015 were used, they were interpolated from daily values measured in conventional and automatic meteorological stations. The climatic data was spacialized into a regular grid  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  for São Paulo State. The probable values and adherence test to the probability density functions (*pdfs*) were calculated on the Module “Frequency distribution, adherence test and probable values calculation”. The  $AWB$  calculation for sugarcane crop was carried out with the water-culture model AquaCrop, version 6.1, provided by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). With the *pdfs* (Exponential, Gamma, Normal, Uniform and Triangular) that best fit  $ET_o$ ,  $P$ ,  $ET_c$ ,  $Arm$ ,  $ETr$ ,  $Def$  and  $Exc$  in each ten-day period, the probable ten-day values of  $Arm$  and  $P$  at 75% probability ( $Arm_{75\%}$  e  $P_{75\%}$ ), and  $Def$ ,  $ET_c$ ,  $ET_o$ ,  $ETr$  and  $Exc$  at 25% probability ( $Def_{25\%}$ ,  $ET_{c25\%}$ ,  $ET_{o25\%}$ ,  $ETr_{25\%}$  and  $Exc_{25\%}$ ). Maps of  $P_{75\%}$ ,  $ET_{c25\%}$ ,  $Arm_{75\%}$ ,  $ETr_{25\%}$ ,  $Def_{25\%}$  and  $Exc_{25\%}$  were generated with the RStudio 4.0 program. Gamma *pdf* showed a better adjustment to the probable ten-day period values of  $P$ ,  $ET_c$ ,  $ETr$ ,  $Def$  and  $Exc$ , and the Normal *pdf* showed a better adjustment to the probable ten-day period values of  $ET_o$  and  $Arm$ . The  $P_{75\%}$  is well defined in the State of São Paulo, being higher in the summer (20 to 53 mm ten-day period<sup>-1</sup>) and spring-summer (15 to 39 mm ten-day period<sup>-1</sup>). The Coastal Region (South and Southeast) has the highest probability of rain throughout the year, except during winter. Winter (0 to 15 mm ten-day) is more likely to lack precipitation ( $P_0 = 0$ ). The  $ET_{o25\%}$  is highest in the spring in the State of São Paulo (38 to 52 mm ten-day period<sup>-1</sup>), falling in autumn-winter (25 to 40 mm ten-day period<sup>-1</sup>). The greatest probabilities of  $ET_{o25\%}$  are in the Northern and Northwestern Regions. Values of  $ET_{c25\%}$  are expected to be less than 10 mm ten-day period<sup>-1</sup> in winter and up to 36 mm ten-day period<sup>-1</sup> in summer.  $Arm_{75\%}$  is expected up to 70 mm in summer, and values up to 120 mm in other seasons. Higher  $Exc_{25\%}$  values are expected during the summer, with a greater likelihood of their absence ( $Exc = 0$ ) during winter in the regions of Araçatuba, Araraquara, São José do Rio Preto, Ribeirão Preto and Piracicaba. In general, the spring is a favorable period for the cultivation of sugar cane in the main regions of São Paulo State. Summer is the period when the highest water consumption is expected by the crop throughout the cycle and may be affected by the lack of available water. In the winter,  $Arm_{75\%}$  is very low in the regions of Araçatuba and Araraquara, and the results obtained show that the crop will suffer from low water availability in this period.

**Key-Words:** Water components. Water relations. AquaCrop. Modelling. Probability density function. Probable values.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Segue abaixo a relação e descrição das principais abreviaturas e símbolos das terminologias ou variáveis que foram utilizadas no texto da dissertação. Não são todas as abreviaturas e símbolos, somente aqueles que se encontram isoladamente distantes, no texto, de sua descrição.

AquaCrop – Modelo desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) para simular o balanço hídrico agrícola (*BHA*) e estimar o rendimento de culturas agrícolas;

*Arm* – Armazenamento de água na zona da raiz;

*Arm*<sub>75%</sub> – Armazenamento da água na zona da raiz a 75% de probabilidade;

*BHA* – Balanço hídrico agrícola;

*Def* – Deficiência hídrica;

*Def*<sub>25%</sub> – Deficiência hídrica a 25% de probabilidade;

*ETc* – Evapotranspiração da cultura;

*ETc*<sub>25%</sub> – Evapotranspiração da cultura a 25% de probabilidade;

*ETo* – Evapotranspiração de referência;

*ETo*<sub>média</sub> – Evapotranspiração de referência média;

*ETo*<sub>25%</sub> – Evapotranspiração de referência a 25% de probabilidade;

*ETr* – Evapotranspiração real;

*ETr*<sub>25%</sub> – Evapotranspiração real a 25% de probabilidade;

*Exc* – Excedente hídrico;

*Exc*<sub>25%</sub> – Excedente hídrico a 25% de probabilidade;

*fdp* – Função densidade de probabilidade;

*fdp's* – Funções de densidade e probabilidade;

*P* – Precipitação pluviométrica;

*P*<sub>média</sub> – Precipitação pluviométrica média;

*P*<sub>75%</sub> – Precipitação pluviométrica a 75% de probabilidade.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL .....	12
1.1	CAPÍTULO I – REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
1.1.1	A importância da água no cultivo agrícola .....	15
1.1.2	Modelos para simulação das componentes hídricas .....	16
1.1.3	Dados climáticos de entrada no AquaCrop .....	20
1.1.4	Cálculo dos valores prováveis de séries de componentes hídricas .....	21
1.2	CONSIDERAÇÃO .....	23
1.3	REFERÊNCIAS .....	24
2	CAPÍTULO II – PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PROVÁVEIS NO ESTADO DE SÃO PAULO .....	29
2.1	RESUMO .....	29
2.2	ABSTRACT .....	30
2.3	INTRODUÇÃO .....	31
2.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	32
2.4.1	Área de estudo .....	32
2.4.2	Dados meteorológicos .....	33
2.4.3	Valores prováveis de precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência .....	34
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
2.5.1	Parâmetros das <i>fdp</i> 's de melhor ajuste e cálculo do valor provável .....	36
2.5.2	Funções densidade de probabilidade .....	37
2.5.3	Valores prováveis de <i>P</i> .....	39
2.5.4	Valores prováveis de <i>ET<sub>o</sub></i> .....	42
2.6	CONCLUSÕES .....	44
2.7	REFERÊNCIAS .....	45
3	CAPÍTULO III – BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA PROVÁVEL PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO .....	49
3.1	RESUMO .....	49
3.2	ABSTRACT .....	50
3.3	INTRODUÇÃO .....	51
3.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	52

3.4.1	Área de estudo .....	52
3.4.2	Dados meteorológicos .....	53
3.4.3	Cálculo do balanço hídrico .....	54
3.4.4	Valores prováveis das componentes do balanço hídrico agrícola para o Estado de São Paulo .....	55
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	57
3.5.1	Parâmetros das <i>fdp</i> 's de melhor ajuste e cálculo do valor provável .....	57
3.5.2	Funções densidade de probabilidade .....	57
3.5.3	Valores prováveis dos dados de saída do <i>BHA</i> .....	59
3.5.4	<i>BHA</i> para cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo .....	65
3.6	CONCLUSÕES .....	67
3.7	REFERÊNCIAS .....	68
4	CONCLUSÕES GERAIS .....	74
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	75
6	REFERÊNCIAS GERAIS .....	76
	APÊNDICE 1 – PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE MELHOR AJUSTE .....	89
	APÊNDICE 2 – PARÂMETROS FÍSICO-HÍDRICOS DOS SOLOS DO ESTADO DE SÃO PAULO UTILIZADOS NO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA.....	92
	APÊNDICE 3 – FREQUÊNCIA DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE MELHOR AJUSTE PARA AS COMPONENTES HÍDRICAS DE SAÍDA DO AQUACROP, PARA O ESTADO DE SÃO PAULO .....	93



## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A cultura da Cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é importante socioeconomicamente no Brasil e no mundo, pois com seu cultivo obtém-se sacarose para a produção de açúcar, aguardente e etanol (IBGE, 2017). Sua expansão está em ascensão e estima-se crescimento de 628,5% da área cultivada em 30 anos (Ribeiro et al., 2016). O Brasil tem grande potencial de exploração agrícola (Almeida et al., 2013) e estudos sobre o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar identificaram o Estado de São Paulo como o maior potencial à expansão canavieira em termos de terras, com 12,6 milhões de hectares (IBGE, 2017).

A área total cultivada com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo é de 5,94 milhões ha, na Safra 2018/2019 (ÚNICA, 2018). A área com maior concentração de cultivo de cana-de-açúcar no Estado encontra-se no centro-norte, com destaque para os Escritórios de Desenvolvimento Rural (EDRs) de São José do Rio Preto e Araçatuba (Rudorff, 2010). Os EDRs com as maiores produções são Barretos, Orlandia e Ribeirão Preto (IEA, 2017).

Das indústrias brasileiras produtoras de açúcar, etanol ou de produção mista, 42,5% estão situadas no Estado de São Paulo (MAPA, 2018c). A produção de cana-de-açúcar é responsável por quase 50% do valor total da produção agropecuária e florestal do Estado (Silva et al., 2017).

Os rendimentos potenciais da cana-de-açúcar dependem de elementos climáticos ocorridos durante seu cultivo. A precipitação é um parâmetro importante, pois os rendimentos da cultura estão diretamente relacionados à quantidade de água disponível no solo, principalmente durante a fase vegetativa, em virtude de seu crescimento vegetativo ser proporcional à água que transpira, sendo que o consumo de água varia com o estágio de desenvolvimento (MAPA, 2018a; MAPA, 2018b; Doorenbos & Kassam, 2000), sendo de 1095 mm a 1595 mm de acordo com estudo realizado no Noroeste Paulista (Avilez et al., 2018).

Os processos que envolvem a infiltração, redistribuição, evapotranspiração e absorção da água no solo pela planta podem ocorrer simultaneamente e afetar os rendimentos da cana-de-açúcar durante todo o seu ciclo, destacando-se a importância de se estudar o fluxo hídrico no sistema agrícola. Dentre as alternativas verificadas na literatura (Souza, 2017), o Balanço Hídrico Agrícola (BHA) possibilita o estudo do ciclo

da água em uma cultura específica ou ecossistema de forma confiável e simplificada (Reichardt & Timm, 2020).

O *BHA* é dependente de variáveis climáticas e geográficas. Seu cálculo permite a verificação de componentes hídricas como armazenamento da água no solo, evapotranspiração real, deficiência e excedentes hídricos de zonas agrícolas com diferentes intensidades de precipitação pluviométrica, auxiliando principalmente no manejo de irrigação (Thomas, 1992). O possível aumento da temperatura global e mudanças no regime das chuvas alterarão o *BHA* com o tempo (Santos et al., 2017), o que chama a atenção à necessidade de se estabelecer um *BHA* para cada região. É um estudo essencial no âmbito agrônomo, principalmente por demonstrar as condições hídricas do solo em que a cana-de-açúcar está sendo cultivada, podendo ser especificadas por estádios de desenvolvimento da planta (Reichardt & Timm, 2020).

O cultivo agrícola necessita de pesquisas e informações inovadoras para que possa usufruir dos recursos hídricos sustentavelmente, mantendo a segurança hídrica e alimentar. Somente 13% do total da área cultivada com cana-de-açúcar no estado de São Paulo recebe irrigação complementar (ANA, 2017). No entanto, estudos sobre déficit hídrico demonstram a necessidade de irrigação, devido à escassez e irregularidade do regime das chuvas (Lopes Sobrinho et al., 2019; Silvestre et al., 2019).

Técnicas e manejo de irrigação corretos são imprescindíveis para se obter alta produtividade, aliados à conservação dos recursos hídricos. Para isso, séries históricas de dados climáticos disponibilizados em escala temporal e espacial são fundamentais em pesquisas para caracterizar e indicar o melhor plano de irrigação para áreas específicas (ANA, 2017). Bancos de dados em *grid* proporcionam adequação das análises quanto às tendências, *outliers* e caracterização de erros em distribuição espaço-temporal. Além de proporcionar modelagem mais rápida, com arquivos mais leves (Goffa et al., 2019; Try et al., 2020).

Estudos recentes vêm abordando o rendimento de culturas em detrimento à fatores climáticos, e modelos de simulação estão sendo desenvolvidos utilizando variáveis de entrada como dados climáticos, tipo de solo e parâmetros da cultura. Nesse sentido, tem-se destacado o modelo AquaCrop, desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), o qual está

sendo bastante estudado e utilizado para simular o *BHA* e estimar o rendimento de culturas agrícolas (Steduto et al., 2009; Vanuytrecht et al., 2014; Raes et al., 2018).

Diante do contexto apresentado, teve-se como objetivo no presente estudo determinar os valores prováveis decendiais da precipitação pluviométrica (*P*) e evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*), bem como das componentes de saída do balanço hídrico agrícola (*BHA*) para a cultura da cana-de-açúcar, para um *grid* regular 0,25° x 0,25° em todo Estado de São Paulo.

A presente dissertação encontra-se subdividida em três capítulos, sendo:

- Capítulo I: Referencial teórico;
- Capítulo II: Precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência prováveis no Estado de São Paulo;
- Capítulo III: Balanço hídrico agrícola provável para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.



## **1.1 CAPÍTULO I – REFERENCIAL TEÓRICO**

### **1.1.1 A importância da água no cultivo agrícola**

A água é essencial para a vida. No entanto, apesar de ser a substância encontrada em maior quantidade na superfície da Terra, distribui-se desigualmente e seu uso indiscriminado pode afetar a segurança hídrica em escalas globais. Portanto, ao planejar o uso de água na agricultura, deve-se visar pela garantia da exigência hídrica das culturas em concordância com a eficiência dos programas de irrigação complementar, para que se alcance alta produtividade mantendo a conservação da água (Maddaus et. al., 2017).

Na planta, a água é responsável pelo turgor das células, crescimento dos tecidos vegetais, transporte de nutrientes, além de participar de processos fisiológicos e hormonais. O consumo hídrico durante o desenvolvimento de uma cultura é elevado. Da quantidade de água absorvida pela planta, até 98% é perdido para a atmosfera pela transpiração. Quando a precipitação é escassa e a água armazenada no solo não é suficiente para a demanda hídrica da cultura, faz-se necessário o planejamento e utilização de métodos artificiais como a irrigação para aplicação de água (Reichardt & Timm, 2020).

Para que planejamentos e projetos agrícolas sejam eficazes, deve-se compreender as componentes hídricas da região e considerar sua variabilidade durante o ciclo da cultura, tendo em vista a importância e atuação da água nos processos de desenvolvimento. A cana-de-açúcar demanda, em geral, entre 1500 e 2500 mm de água por ciclo (Doorenbos & Kassam, 1979), variável com o local de cultivo e variedade, sendo de 1095 mm a 1595 mm por ciclo no Noroeste do Estado de São Paulo (Avilez et al., 2018). O correto planejamento de cultivo agrícola é crucial para se alcançar boa produtividade. Com essa finalidade, pesquisadores têm utilizado modelos matemáticos para compreender como as componentes hídricas afetam o rendimento das culturas (Steduto et al., 2009; Vanuytrecht et al., 2014).

### 1.1.2 Modelos para simulação das componentes hídricas

Os modelos matemáticos são estruturados ou desenvolvidos com equações matemáticas capazes de simular e prever diversos aspectos de um sistema (Witelski & Bowen, 2015). Atualmente, muitos modelos de produção de culturas estão disponíveis na literatura, mas poucos se destinam ao estudo da produção da cana-de-açúcar. Na TABELA 1.1 encontram-se alguns modelos desenvolvidos para simular o rendimento da cana-de-açúcar levando em consideração parâmetros edafoclimáticos da localidade.

O modelo água-cultura AquaCrop foi desenvolvido pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), para estimar a produtividade das culturas em relação ao suprimento de água e manejo agrônomo, tendo como base a fisiologia da planta estudada em relação a disponibilidade hídrica do solo estudado. O AquaCrop simula rendimentos atingíveis mediante o consumo hídrico em condições naturais em campo, ou considerando a irrigação artificial, complementar ou déficit hídrico (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2018).

O AquaCrop pode ser considerado um modelo dinâmico, simples e eficiente. Suas rotinas são capazes de simular o rendimento de culturas sob várias condições ambientais e de manejo, usando poucos parâmetros conservadores da cultura e pequeno número de variáveis de entrada, como a precipitação pluviométrica ( $P$ ; mm dia<sup>-1</sup>), evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ; mm dia<sup>-1</sup>) e atributos físico-hídricos do solo (Vanuytrecht et al., 2014).

Entre outros modelos, o AquaCrop é voltado ao estudo do uso da água pela cultura. Se baseia na cobertura do dossel, considerando valores da produtividade da água normalizados, além da demanda e da concentração de CO<sub>2</sub>. É capaz de realizar as simulações para diversos climas e localidades e requer poucos parâmetros como dados de entrada. Apresenta interface bem desenvolvida e intuitiva (FIGURA 1.1) disponível nos idiomas inglês e francês, com aplicabilidade em diversos sistemas agrícolas existentes (Raes et al., 2018).

TABELA 1.1 – MODELOS QUE REALIZAM A SIMULAÇÃO DO RENDIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR.

MODELOS	AQUACROP – FAO	AUSCANE – CSIRO	CANEGRO – DSSAT	APSIM – APSRU
Descrição	Desenvolvido pela FAO, aborda a segurança alimentar e avalia o efeito do meio ambiente e da gestão na produção agrícola.	Desenvolvido na Austrália em 1995, é uma versão modificada de <i>EPIC</i> para simular o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar.	Desenvolvido na África do Sul em 1991, utiliza informações genéticas definidas em espécie, ecotipo e arquivos de cultivar.	Desenvolvido na Austrália em 1990, é uma plataforma para simulação de processos biofísicos em sistemas de cultivo.
Metodologia	Dados de entrada: Climáticos, características das culturas e do solo (divididas em perfil do solo e características das águas subterrâneas) e manejo (manejo de campo ou da irrigação). Particularmente adequado para condições em que a água é um fator chave limitante na produção agrícola.	Dados de entrada: Informações básicas de clima, solo, detalhes das operações de lavoura (plantio, cultivo e colheita) e detalhes do gerenciamento da colheita (taxa e época das aplicações de irrigação e fertilizantes). Características das culturas, como a eficiência da conversão de energia solar em biomassa vegetal, partição de biomassa, conteúdo de nutrientes da biomassa vegetal e relações de estresse, são incorporadas através do coeficiente escolhido especificamente para cada variedade.	Dados de entrada: Manejo, clima (temperatura, precipitação, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento), solo (características de retenção de água, infiltração e da raiz) e cultura (genótipo, área de cultivo, época de cultivo e ciclo). Possui diversas opções de simulações e produz arquivos de saída específicos para a cana-de-açúcar associados a evapotranspiração, conteúdo de água no solo e parâmetros climáticos diários.	Dados de entrada: Clima (ano, dia juliano, radiação solar, temperatura e precipitação), solo (parâmetros hídricos e químicos), manejo (rotação de culturas, fertilização, irrigação) e cultura (época de semeadura). Possui numerosas culturas e pastagens disponíveis para simulação divididas em variedades, incluindo a cana-de-açúcar.
Objetivo	Simular a resposta do rendimento das culturas à água.	Simular o rendimento e o teor de açúcar de cada cultura em diferentes durações de ciclo.	Simular o rendimento de cana planta e soca associados a diferentes parâmetros hídricos e climáticos.	Simular a água no solo, dinâmica de C, N e P e sua interação nos sistemas de cultivo / manejo, baseados em dados climáticos diários.
Limitações	Simulações para um único ciclo de crescimento e em uma escala de campo. Considera somente entradas verticais.	Aspectos biológicos da cana-de-açúcar e códigos desestruturados.	Validação do modelo e avaliação das variáveis de saída.	As simulações atuais do conteúdo de água da cana não são confiáveis em algumas regiões.
Fonte	Mejias & Piraux (2017)	Jones et al. (1988)	Jones & Singels (2008)	Gaydon (2014)



FIGURA 1.1 – FORMULÁRIO PRINCIPAL DO MODELO AQUACROP, VERSÃO 6.1 (2018), PARA ESCOLHA DAS OPÇÕES, ENTRADA DE DADOS E VERIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS.

**Main menu**

**Environment and Crop**

**Climate**

Climate: (None) Specify climatic data when Running AquaCrop

**Crop**

Crop: DEFAULT.CRO a generic crop  
Growing cycle: Day 1 after sowing: 22 March - Maturity: 24 July  
Calendar mode

**Management**

Irrigation: (None) Rainfed cropping

Field: (None) No specific field management

**Soil**

Soil profile: DEFAULT.SOL deep loamy soil profile

Groundwater: (None) no shallow groundwater table

**Simulation**

Simulation period: Simulation period: from 22 March - to 24 July

Initial conditions: (None) Soil water profile at Field Capacity

Off-season: Simulation period linked to cropping period

Project: (None) No specific project

Field data: (None) No field observations

**Run** <<<

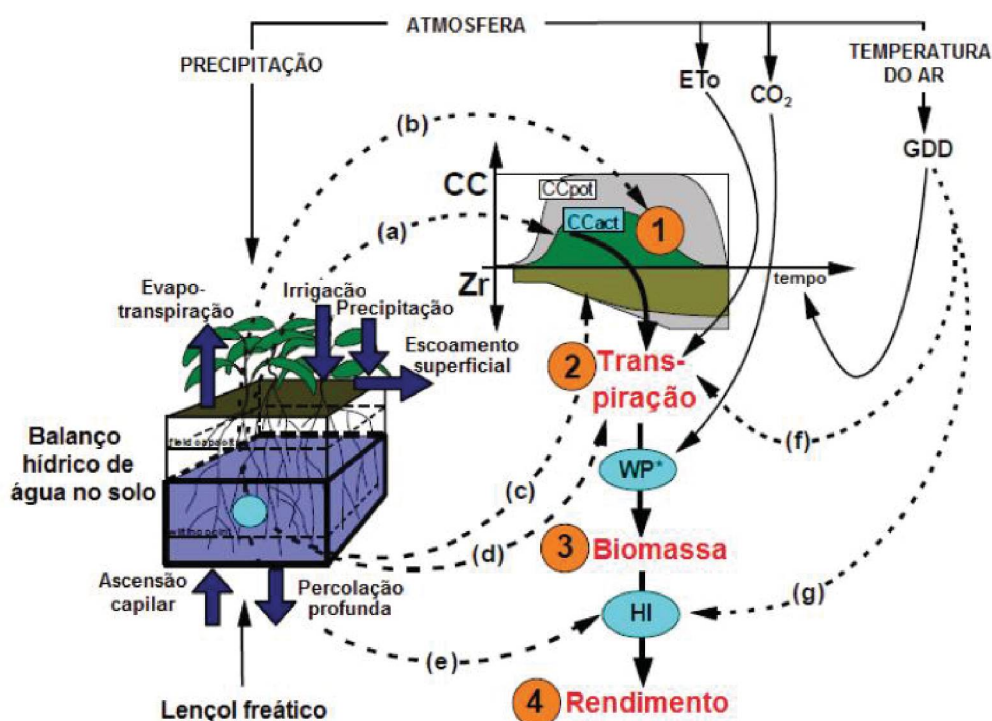
**Exit Program**

FONTE: FAO (2018).

O esquema de operação utilizado no AquaCrop baseia-se em dados de solo, clima e da cultura de interesse (FIGURA 1.2). Seu sistema conta com o estudo da relação solo-planta-atmosfera, desenvolvimento do balanço hídrico, processos de desenvolvimento, crescimento e rendimento da cultura, regime térmico e de precipitação, demanda evaporativa, concentração de CO<sub>2</sub> do local, além dos métodos de manejo empregados no cultivo (Raes et al., 2018). O modelo tem apresentado resultados satisfatórios e coerentes entre dados observados e simulados, como nos estudos: Boudhina et al. (2019) estimaram a evapotranspiração de cultura e produção de biomassa de trigo na Tunísia; Banda et al. (2019) analisaram os impactos econômicos do déficit de irrigação no cultivo da cana-de-açúcar em Malawi, África Oriental; Garcia-Vila et al. (2019) avaliaram as respostas da Beterraba Sacarina à irrigação com o objetivo de otimizar a alocação de água em Córdoba, na Espanha;

Silvestre et al. (2019) estimaram a melhor época de plantio e produtividade da cana-de-açúcar em São Roque do Canaã, no Espírito Santo; e, López-Urrea et al. (2020) compararam os modelos AquaCrop e MOPECO, realizando a parametrização de ambos para a cultura da cevada no sul da Espanha.

FIGURA 1.2 – ESQUEMA CONTENDO OS FLUXOS E PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO DESENVOLVIMENTO DE CULTURAS NO MODELO AQUACROP.



Legenda: CC – cobertura simulada do dossel ( $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ ); CCpot – cobertura potencial do dossel ( $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ ); Zr – profundidade do sistema radicular (m); ETo – evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ); GDD – graus dia de desenvolvimento ( $^{\circ}\text{C dia}^{-1}$ ); WP\* – Produtividade da cultura pela água ( $\text{kg m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ); e, HI – índice de referência (%).

FONTE: Rosa (2018), adaptado de Raes et al. (2018).

Os procedimentos realizados no AquaCrop para o cálculo do Balanço Hídrico Agrícola (BHA) podem ser encontrados no Capítulo 3 do Manual de Referência do AquaCrop versão 6.0 – 6.1 (Raes et al., 2018). O autor apresenta as equações utilizadas no *software* para a determinação do armazenamento de água no solo na zona da raiz, umidade no solo, profundidade efetiva do sistema radicular, drenagem profunda, escoamento superficial, infiltração da água no solo, ascensão capilar, evaporação do solo e transpiração da cultura. Nos dados de saída do AquaCrop, a evapotranspiração de cultura é identificada com a soma da evaporação do solo e a transpiração da cultura.



### 1.1.3 Dados climáticos de entrada no AquaCrop

O conjunto de dados climáticos utilizados como entrada nos modelos de rendimento de cultura podem variar conforme o espaço, tempo e fonte de dados. Bancos de dados de estilos variados vem sendo criados ao longo dos anos por pesquisadores, a fim de encontrar a melhor adaptação a seus estudos. Atualmente, pesquisadores têm intensificado o uso de dados espacializados, tendo como fonte satélites, métodos de reanálises e interpolação. Os resultados simulados com os modelos têm apresentado boa concordância com dados observados, e maior acurácia quando há maior número de estações meteorológicas envolvidas na coleta de dados (Xavier et al., 2016; Beck et al., 2017; Hu et al., 2018; Try et al., 2020).

O AquaCrop é alimentado principalmente com os dados climáticos diários de precipitação pluviométrica ( $P$ ) e evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ). A  $P$  é uma componente hídrica mais fácil de ser medida e encontrada nas bases de dados dos órgãos governamentais. A  $ET_o$  por outro lado, raramente é medida e precisa ser estimada (Raes et al., 2018).

A  $ET_o$  é uma componente hídrica estabelecida para uma cultura de referência, em condições hídricas ideais, independente da fase de desenvolvimento e tipo de manejo aplicado. Baseia-se somente em parâmetros climáticos, por isso pode ser calculada somente com dados meteorológicos, sem considerar características das culturas e solo (Allen et al., 1998). A  $ET_o$  é fundamental nos estudos de disponibilidade de água na agricultura, como o  $BHA$  (Thomas, 1992), para a criação e operação de projetos de irrigação (Abdullah et al., 2015), manejo de irrigação (Marin et al., 2019) e dimensionamento de sistemas (Alves Sobrinho et al., 2019).

A  $ET_o$ , geralmente expressa em  $\text{mm período}^{-1}$ , foi definida por Doorenbos e Pruitt (1977) como a “taxa de evapotranspiração de uma superfície extensa de 8 a 15 cm de altura, coberta com grama verde de altura uniforme e em crescimento ativo, sombreando o solo e sem deficiência hídrica”. Atualizações no conceito indicam uma cultura baixa, como a grama, com altura de 12 cm, albedo de 0,23 e resistência aerodinâmica de  $70 \text{ s m}^{-1}$  (Allen, et al., 1998). É considerada uma variável provável por depender de outros parâmetros climatológicos (Khanmohammadi et al., 2017). Sua determinação tem sido cada vez mais estudada devido à importância da água na sustentabilidade, por ser substância essencial à vida (Abdullah et al., 2015). Devido à

dificuldade de sua medida, a literatura é riquíssima em exemplos de métodos para realizar a estimativa da  $ET_o$  (Souza, 2017). Contudo, atualmente o método Penman-Monteith é reconhecido pela maioria dos pesquisadores como padrão para estimar a  $ET_o$  (Allen et al., 1998; ASCE-EWRI, 2005).

#### 1.1.4 Cálculo dos valores prováveis de séries de componentes hídricas

No presente estudo, os dados climáticos diários de  $P$  e  $ET_o$  serviram para duas finalidades: *i*) Entrada no AquaCrop, para obtenção das componentes hídricas de saída (evapotranspiração da cultura, armazenamento de água na zona da raiz, evapotranspiração real, deficiência e excedente hídrico) e, *ii*) Cálculo de valores decendiais prováveis das componentes hídricas.

A precipitação pluviométrica provável é considerada a precipitação potencialmente possível de ocorrer. É utilizada para realizar o planejamento e projetos voltados à utilização da água, principalmente irrigação, com grande importância para locais em que há déficit hídrico para os cultivos agrícolas. Tem aplicação também na formulação de mapas de previsão de inundação, secas, frequência esperada de eventos extremos, análise da tendência do regime das chuvas, entre outros (Kunkel et al., 2013; Banjare et al., 2019; Kim & Han, 2020; Sabino et al., 2020; Vieira et al., 2020).

O estudo dos valores prováveis se inicia com a realização das distribuições de frequência de cada série de dados da componente hídrica em análise. A distribuição de frequência de uma componente hídrica é uma estimativa da distribuição verdadeira da componente, com valor de  $n$  (observações) no infinito. Posteriormente, tenta-se ajustar funções densidade de probabilidade ( $fdp$ ) à distribuição de frequência de cada série de dados de componentes hídricas. As  $fdp$ 's são modelos matemáticos com o intuito de determinar a probabilidade que dado evento possa ocorrer. Entre as mais utilizadas na pesquisa agropecuária estão a Exponencial, Gama, Normal, Uniforme e Triangular (Souza, 2018).

Souza (2006) desenvolveu uma planilha eletrônica automática (módulo) bem simples e de uso intuitivo nas atividades de desenvolvimento de rotinas computacionais da Plataforma Moretti. O módulo, denominado "Distribuição de frequência, teste de aderência e cálculo de valores prováveis", foi desenvolvido no

Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA)/Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Paraná. A primeira versão do módulo possui rotinas que verificam o ajuste de cinco *fdp*'s (Exponencial, Gama, Normal, Uniforme e Triangular) às distribuições de frequência de valores decendiais de componentes hídricas observadas. A qualidade do ajuste é verificada por meio do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov. Com auxílio da ferramenta “solver” a planilha eletrônica também determina os valores prováveis de ocorrência das componentes hídricas com a *fdp* de melhor ajuste, à determinado nível de probabilidade escolhido. Jerszurki (2013) constituiu um roteiro (identificado pela autora como Apêndice 2) contendo as principais informações técnicas das *fdp*'s Exponencial, Gama, Normal, Uniforme e Triangular, que foram utilizadas nas rotinas desenvolvidas no módulo “Distribuição de frequência, teste de aderência e cálculo dos valores prováveis” da Plataforma Moretti.

No módulo da Plataforma Moretti, a determinação dos valores prováveis pode ser realizada para vários níveis de probabilidade (Souza 2006; Souza et al., 2013). No cálculo dos valores prováveis, recomenda-se o uso do nível de 75% de probabilidade para a armazenamento de água na zona da raiz ( $Arm_{75\%}$ ) e precipitação pluviométrica ( $P_{75\%}$ ), e 25% de probabilidade para a evapotranspiração de referência ( $ET_{o_{25\%}}$ ) (Doorenbos & Pruitt, 1977; Saad e Scaloppi, 1988), além de déficit hídrico ( $Def_{25\%}$ ), evapotranspiração da cultura ( $ET_{c_{25\%}}$ ), evapotranspiração real ( $ET_{r_{25\%}}$ ) e excedente hídrico ( $Exc_{25\%}$ ), por ser o mais adequado para fins agropecuários (Frizzzone et al., 2005), garantindo a minimização de riscos (Jensen, 1974).

O evento provável a 25% refere-se ao valor da componente hídrica que tenha 75% de probabilidade de ser igualado ou superado, o que corresponde à probabilidade da componente hídrica ocorrer três vezes a cada quatro anos, ou com tempo de retorno  $T = 1,33$  anos, em média (Souza, 2017; Gurski, 2018). Por meio desse parâmetro, é possível identificar a baixa ocorrência da componente hídrica e antecipar o manejo para minimizar riscos por déficit hídrico (Souza et al., 2013). Quanto mais alto o nível de probabilidade utilizado, menor será o valor da componente hídrica provável encontrada, gerando aumento da confiabilidade da estimativa em dada localidade (Passos et al., 2017).

O evento provável a 75% refere-se ao valor da componente hídrica que tenha 25% de probabilidade de ser igualado ou superado, o que corresponde à



probabilidade da componente hídrica ocorrer uma vez a cada quatro anos ou com tempo de retorno  $T = 4$  anos, em média (Souza, 2017; Gurski, 2018).

Valores de  $ET_{c_{25\%}}$  e  $P_{75\%}$  possibilitam a identificação de ocorrência de alta evapotranspiração combinada à baixa precipitação pluviométrica, e a antecipação do manejo para minimização de riscos por déficit hídrico (Souza et al., 2013).

Para verificar se a *fdp* escolhida realmente representa adequadamente a série de dados estudada é necessário realizar testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov para verificar a aderência das *fdp*'s ao conjunto de dados observados. O teste confronta duas distribuições de frequências acumuladas, sendo uma teórica  $F'(x)$  e a outra derivada dos dados observados  $F(x)$ . O valor  $D_{max}$  crítico calculado é comparado com o valor de  $D_{max}$  tabelado da estatística de Kolmogorov-Smirnov, a determinado nível de significância (Souza, 2013; Souza, 2018):

$$D_{max} = \text{Max } |F(x) - F'(x)|$$

Sendo:  $D_{max}$  – valor crítico para a estatística de Kolmogorov-Smirnov;  $F(x)$  – função densidade de probabilidade teórica;  $F'(x)$  – função de distribuição de probabilidade observada.

Assim, quando o valor “ $D_{max}$  calculado” é menor que o valor “ $D_{max}$  tabelado” aceita-se a hipótese de que a função densidade de probabilidade (*fdp*) se ajustou bem aos valores das componentes hídricas a 5% de significância. Caso contrário, a hipótese é rejeitada (Souza, 2018).

## 1.2 CONSIDERAÇÃO

Conhecer o ciclo hidrológico e entender como as componentes hídricas tendem a atuar regionalmente proporciona melhores condições ao uso e manejo sustentável da água. Devido a constante mudança climática, o estudo atualizado da tendência das componentes hídricas e a determinação do *BHA* possibilitam o melhor planejamento agrícola. Da mesma forma, a obtenção de valores prováveis das componentes hídricas do *BHA* possibilita o correto dimensionamento de sistemas hídricos, visando o bom desenvolvimento e a alta produtividade da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

### 1.3 REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, S.S.; MALEK, M.A.; ABDULLAH, N.S.; KISI, O.; YAP, K.S. Extreme Learning Machines: A new approach for prediction of reference evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 527, p.184-195, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.073>.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; MARTIN, S. **Crop Evapotranspiration**. Rome: FAO. 1998, 297p. (FAO, Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALMEIDA, T.S.; CALIJURI, M.L.; PINTO, L.B. Zoneamento agro-climático da cana-de-açúcar para o Estado de Minas Gerais com base em regressões múltiplas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.3, p. 352-355, 2013.
- ALVES SOBRINHO, T.; RODRIGUES, D.B.B.; OLIVEIRA, P.T.S.; REBUCCI, L.C.S.; PERTUSSATTI, C.A. Estimativa da evapotranspiração de referência através de redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 197-203, 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-77862011000200004>.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Levantamento da Cana-de-Açúcar Irrigada na Região Centro-Sul do Brasil**. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2017.
- ASCE-EWRI. **The ASCE standardized reference evapotranspiration equation**. Report of the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Reston: Institute of the American Society of Civil Engineers; 2005.
- AVILEZ, A.M.A.; HERNANDEZ, F.B.T.; BISPO, R.C.; GIOVANELLI, L.B. Necessidade hídrica da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 171-188, 2018. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2018v1n1p171-188>.
- BANDA, M.B.; HEEREN, D.M.; MARTIN, D.L.; MUNOZ-ARRIOLA, F.; HAYDE, L.G. Economic Analysis of Deficit Irrigation in Sugarcane Farming. **American Society of Agriculture and Biological Engineers**, p.1-13, 2019. ASABE. <http://dx.doi.org/10.13031/aim.201900852>.
- BANJARE, S.; RAWAT, S.; GAUTAM, S. Rainfall probability analysis for crop planning in Allahabad district of eastern Uttar Pradesh. Short Communication. **Journal of Agrometeorology**, v. 1 n. 21, p. 112-113, 2019.
- BECK, H.E.; VAN DIJK, A.I.J.M.; LEVIZZANI, V.; SCHELLEKENS, J.; MIRALLES, D.G.; MARTENS, B.; ROO, A. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 1, p. 589-615, 2017. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>.
- BOUDHINA, N.; MASMOUDI, M.M; ALAYA, I.; JACOB, F.; MECHLIA, N.B. Use of AquaCrop model for estimating crop evapotranspiration and biomass production in hilly topography. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 8, p. 1-7, 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-019-4434-9>.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Trad. de H.R. Gheyi, A.A. de Sousa, F.A.V. Damasceno, J.F. de Medeiros. 2. ed. Campina Grande: UFPB, 2000. 221p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 144p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 24).

FRIZZONE, J.A.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SOUZA, J.L.M.; ZOCOLER, J.L. **Planejamento de irrigação**: análise de decisão de investimento. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Teresina: Embrapa Meio Norte, 2005. 627p

GARCIA-VILA, M.; MORILLO-VELARDE, R.; FERERES, E. Modeling sugar beet responses to irrigation with AquaCrop for optimizing water allocation. **Water**, v. 11, n. 9, p. 1918-1936, 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11091918>.

GAYDON, D.S. **The APSIM model**: an overview. Austrália: Csiro, 2014.

GOFFA, F.; MAMARA, A.; ANADRANISTAKIS, M.; FLOCAS, H. Developing gridded climate data sets of precipitation for Greece based on homogenized time series. **Climate**, v. 5, n. 7, p. 68-89, 2019.

GURSKI, B.C. Componentes hídricas prováveis e zoneamento de risco agroclimático para o Estado do Paraná. Curitiba, 2018. 132p. Tese (Doutorado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

HU, Z.; ZHOU, Q.; CHEN, X.; LI, J.; LI, Q.; CHEN, D.; LIU, W.; YIN, G. Evaluation of three global gridded precipitation data sets in central Asia based on rain gauge observations. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 9, p. 3475-3493, 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.5510>.

IBGE. **A geografia da cana-de-açúcar**: dinâmica territorial da produção agropecuária. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

IEA - INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. Banco de dados. São Paulo: IEA, 2017. Disponível em: <[http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod\\_sis=1&idioma=1](http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod_sis=1&idioma=1)> Acesso em: 10 set 2018.

JENSEN, M.E. **Design and operation of farm irrigation systems**. New York: American Society of Agricultural Engineers, 1974.

JERSZURKI, D. Caracterização das relações hídricas para a cultura do *Pinus taeda* no município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. Curitiba, 2013. 90p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

JONES, C.A.; WEGENER, M.K.; RUSSEL, J.S. **AUSCANE**: simulation of Australian sugarcane with EPIC. Brisbane: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1988.

JONES, M.; SINGELS, A. DSSAT v4.5 - **Canegro Sugarcane Plant Module**: user documentation. Mount Edgecombe: ICSM, 2008.



KHANMOHAMMADI, N.; REZAIE, H.; MONTASERI, M.; BEHMANESH, J. Regional probability distribution of the annual reference evapotranspiration and its effective parameters in Iran. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 134, n. 1-2, p.411-422, 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-017-2283-6>.

KIM, H. II; HAN, K. Y. Inundation Map Prediction with Rainfall Return Period and Machine Learning. **Water**, v. 12, n. 6, p. 1552-1568, 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12061552>.

KUNKEL, K.E.; KARL, T.R.; EASTERLING, D.R.; REDMOND, K.; YOUNG, J.; YIN, X.; HENNON, P. Probable maximum precipitation and climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 7, p.1402-1408, 12 abr. 2013. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50334>.

LOPES SOBRINHO, O.P.; SILVA, G.S.; PEREIRA, A.I.S.; SOUSA, A.B.; CASTRO JÚNIOR, W.L.; SANTOS, L.N.S. A cultura da Cana-De-Açúcar (*Saccharum officinarum*) e o manejo da irrigação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 4, p. 1605-1625, 2019. Centro Universitario de Maringa. <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n4p1605-1625>.

LÓPEZ-URREA, R.; DOMÍNGUEZ, A.; PARDO, J.J.; MONTROYA, F.; GARCÍA-VILA, M.; MARTÍNEZ-ROMERO, A. Parameterization and comparison of the AquaCrop and MOPECO models for a high-yielding barley cultivar under different irrigation levels. **Agricultural Water Management**, v. 230, p. 105931-105946, 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105931>.

MADDAUS, M.L.; MADDAUS, W.O.; MADDAUS, L.A. **Water conservation programs: a planning manual**. 2. ed. Denver: American Water Works Association, 2017.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Parâmetros de risco climático**. Brasília: MAPA, 2018a.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Portaria nº 43, de 30 de abril de 2018. Brasília: MAPA, 2018b.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Relação de instituições cadastradas no departamento de cana-de-açúcar e agroenergia**. Brasília: MAPA, 2018c.

MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; NASSIF, D.S.P.; VIANNA, M.S.; PILAU, F.G.; SILVA, E.H.F.M.; SOBENKO, L.R.; GONÇALVES, A.O.; PEREIRA, R.A.A.; CARVALHO, K.S. Revisiting the crop coefficient–reference evapotranspiration procedure for improving irrigation management. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 138, n. 3-4, p. 1785-1793, 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-019-02940-7>.

MEJIAS, P.; PIRAUX, M. **AquaCrop: the crop water productivity model**. FAO, 2017.

PASSOS, M.L.V.; RAPOSO, A.B.; MENDES, T.J. Estimativa da distribuição da precipitação pluviométrica provável em diferentes níveis de probabilidade de ocorrência. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 1, p. 1106-1115, 2017.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. **AquaCrop 6.0 – 6.1**: reference manual. Rome: FAO, 2018.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Soil, Plant and Atmosphere**: concepts, processes and applications. Switzerland: Springer International Publishing, 2020.

RIBEIRO, N.V.; FERREIRA, L.G.; FERREIRA, N.C. Avaliação da expansão do cultivo da cana-de-açúcar no bioma cerrado por meio de modelagem dinâmica da paisagem. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 1, p. 1-14, 2016.

ROSA, S.L.K. Análise de sensibilidade, calibração e validação da produtividade do trigo com o modelo AquaCrop na região dos Campos Gerais. Curitiba, 2018. 147p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

RUDORFF, B.F.T. et al. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using landsat data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010. doi: <10.3390/rs2041057>.

SAAD, J.C.C.; SCALOPPI, E.J. Análise dos principais métodos climatológicos para estimativa da evapotranspiração. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, n. 8, 1988, Florianópolis, Anais... Florianópolis: ABID, v.2, p.1037–1052, 1988.

SABINO, M.; SOUZA, A.P.; ULIANA, E.M.; LISBOA, L.; ALMEIDA, F.T.; ZOLIN, C.A. Intensity-duration-frequency of maximum rainfall in Mato Grosso State. **Ambiente e Agua**, v. 15, n. 1, p. 1-12, 2020. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrograficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2373>.

SANTOS, D.F. et al. Impacts of climate projections on water balance and implications on olive crop in Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 77-82, 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p77-82>.

SILVA, J.R.; COELHO, P.J.; CASER, D.V.; BUENO, C.R.F.; BINI, D.L.C.; PINATTI, E.; CASTANHO FILHO, E.P. Valor da produção agropecuária do Estado de São Paulo: resultado final 2016. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, v. 12, n. 4, 2017.

SILVESTRE, N.G.; VIEIRA, G.H.S.; NASCIMENTO, D.P. Estimativa da melhor época de plantio e produtividade de cana-de-açúcar com o modelo agrometeorológico AquaCrop. **IFES Ciência**, v. 5, n. 1, p. 197-207, 2019.

SOUZA J.L.M, JERSZURKI D., DAMAZIO E.C. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 7, p. 693-702, 2013.

SOUZA, J.L.M. PLATAFORMA MORETTI – Módulo: Distribuição de frequência, teste de aderência e cálculo de valores prováveis, Versão 2.0, 2005(b). Curitiba: UFPR/SCA/DSEA. 2006.

SOUZA, J.L.M **Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados**: aplicado às ciências agrárias. Curitiba, Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2018. (Manual didático)



SOUZA, J.L.M. **Ciclo da água na agricultura**: fundamentos para o estudo do sistema solo-planta-atmosfera. Curitiba: Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2017. (Manual didático)

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: concepts and underlying principles: concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>.

THOMAS, A. Agricultural water balance of Yunnan Province, PR China: agroclimatic zoning with a Geographical Information System. **Agricultural Water Management**, v. 21, n. 4, p. 249-263, 1992. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3774\(92\)90049-3](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3774(92)90049-3).

TRY, S.; TANAKA, S.; TANAKA, K.; SAYAMA, T.; OEURN, C.; UK, S.; TAKARA, K.; HU, M.; HAN, D. Comparison of gridded precipitation datasets for rainfall-runoff and inundation modeling in the Mekong River Basin. **Plos One**, v. 15, n. 1, p. 1-13, 2020. Public Library of Science (PLOS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0226814>.

ÚNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Área cultivada com cana-de-açúcar - Estado de São Paulo. São Paulo: 2018. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-area-inep.php>> Acesso em: 10 set 2018.

VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; HENG, L.K.; VILA, M.C.; MORENO, P.M. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 351-360, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>.

VIEIRA, F.R.; THEBALDI, M.S.; SILVEIRA, B.; NOGUEIRA, V.H.B. Probable rainfall of Divinópolis city, Minas Gerais State, Brazil. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 28, n. 1, p. 89-99, 2020.

WITELSKI, T.; BOWEN, M. Methods of Mathematical Modelling. Springer Undergraduate Mathematics Series, p. 1-309, 2015. Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-23042-9>.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, P. 2644–2659, 2016.



## 2 CAPÍTULO II – PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PROVÁVEIS NO ESTADO DE SÃO PAULO

### 2.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente estudo determinar os parâmetros da função densidade de probabilidade de melhor ajuste e estabelecer a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) e precipitação pluviométrica ( $P$ ) prováveis para o *grid* regular  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , para o Estado de São Paulo. Este estudo foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA) / SCA / UFPR. A aderência das funções de densidade probabilidade ( $fdp$ 's) aos valores decendiais observados foi obtida com o teste Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância. Com as  $fdp$ 's (Exponencial, Gama, Normal, Uniforme e Triangular) que melhor se ajustaram às séries de  $P$  e  $ET_o$  em cada decêndio do ano, foram determinados os valores decendiais prováveis de  $P$  a 75% de probabilidade ( $P_{75\%}$ ), e  $ET_o$  a 25% de probabilidade ( $ET_{o25\%}$ ) para cada localidade do *grid* regular utilizado. Foram gerados mapas de  $P_{75\%}$  e  $ET_{o25\%}$  com o programa Rstudio. A  $fdp$ 's Gama e Normal, respectivamente, ajustaram-se melhor em aproximadamente 60% e 55% do total dos testes de aderência realizados às distribuições de frequência contendo valores decendiais de  $P$  e  $ET_o$ . A  $P_{75\%}$  é bem definida no Estado de São Paulo, sendo superior no verão (20 a 53 mm decêndio<sup>-1</sup>) e primavera-verão (15 a 39 mm decêndio<sup>-1</sup>). A região litorânea (sul e sudeste) tem as maiores probabilidades de chuva ao longo do ano, com exceção do inverno. O inverno (0 a 15 mm decêndio<sup>-1</sup>) tem maior probabilidade de ausência de precipitação ( $P_o = 0$ ). A  $ET_{o25\%}$  é mais alta na primavera no Estado de São Paulo (38 a 52 mm decêndio<sup>-1</sup>), caindo no outono-inverno (25 a 40 mm decêndio<sup>-1</sup>). As maiores probabilidades de  $ET_{o25\%}$  encontra-se nas regiões norte e noroeste.

Palavras-chave: Componentes hídricas. Relações hídricas. Função densidade de probabilidade.

## 2.2 ABSTRACT

The aim of the present study was to determine the parameters of the probability density function for the best fit and to establish the reference evapotranspiration ( $ET_o$ ) and rainfall ( $P$ ) probable for the regular  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  grid for São Paulo State. This research was carried out at the Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA) / SCA / UFPR. The adherence of the ten-day values to the probability density functions (*pdfs*) was obtained with the Kolmogorov-Smirnov test at 5% significance. With the *pdfs* (Exponential, Gamma, Normal, Uniform and Triangular) that best fit  $P$  and  $ET_o$  series in each ten-year period of the year, the probable ten-day values of  $P$  at 75% probability ( $P_{75\%}$ ) and  $ET_o$  at 25% probability ( $ET_{o25\%}$ ) were determined for each locality in the regular grid used. The  $P_{75\%}$  and  $ET_{o25\%}$  maps were generated with the Rstudio program. Gamma *pdf* was better adjusted by 60% of the total adherence tests performed to frequency distributions with ten-day period  $P$  values. The Normal *pdf* had a better adjustment in 55% of the total tests of adherence to the frequency distributions with ten-day period  $ET_o$  values. The  $P_{75\%}$  is well defined in the State of São Paulo, being higher in the summer (20 to 53 mm ten-day period<sup>-1</sup>) and spring-summer (15 to 39 mm ten-day period<sup>-1</sup>). The Coastal Region (South and Southeast) has the highest probability of rain throughout the year, except during winter. Winter (0 to 15 mm ten-day) is more likely to lack precipitation ( $P_o = 0$ ). The  $ET_{o25\%}$  is highest in the spring in the State of São Paulo (38 to 52 mm ten-day period<sup>-1</sup>), falling in autumn-winter (25 to 40 mm ten-day period<sup>-1</sup>). The greatest probabilities of  $ET_{o25\%}$  are in the Northern and Northwestern Regions.

Key-words: Water components. Water relations. Probability density function.

## 2.3 INTRODUÇÃO

Na safra 2017/2018, a produção agrícola no Estado de São Paulo sofreu perdas, devido à deficiência hídrica ocorrida entre maio e julho, com estiagens de longo período, provocando maior susceptibilidade das plantas às doenças e pragas (Camargo et al., 2019). Os locais com má distribuição de chuvas são os mais indicados para o estudo de componentes hídricas, como os valores prováveis da precipitação pluviométrica e evapotranspiração (Souza et al., 2018). Todavia, é importante realizar estudo em todos os locais que necessitem manejo hídrico, tanto para excesso como falta de água. Esses estudos servem para o planejamento, projeto e manejo hídrico em atividades agrícolas de sequeiro e irrigadas (Souza et al., 2014b).

A precipitação pluviométrica ( $P$ ) e evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) são componente hídrica importante para a agricultura. Por ser um processo hidrológico aleatório, há dificuldades em planejar o seu uso em atividades agrícolas, devido à falta de conhecimento sobre sua tendência ao longo do tempo e espaço (Sampaio et al., 2006). A utilização de valores indevidos de  $P$  e  $ET_o$  pode causar super ou subdimensionamento de projetos na área de engenharia rural (Souza et al., 2018).

A  $P$  pode ser facilmente medida com pluviômetros. No entanto, a  $ET_o$  é uma variável climática consideravelmente mais difícil de se obter medida com métodos tradicionais, como os evapotranspirômetros e lisímetros (Souza et al., 2017). O conhecimento das duas componentes climáticas é importantíssimo para analisar e planejar sistemas hídricos com base em balanço hídrico agrícola, permitindo a avaliação e uso eficiente e sustentável da água, inclusive no manejo de irrigação (Sorensen, 2008; Souza & Gomes, 2008).

Devido à dificuldade de medição, por algumas limitações à aplicação de métodos meteorológicos e hidrológicos, a  $ET_o$  na maioria das vezes é estimada. A escolha do método a ser utilizado para seu cálculo depende dos dados climáticos disponíveis (em quantidade e qualidade), além de levar em conta a precisão em que se deseja obter os resultados, sua influência no espaço e/ou no tempo e fácil aplicabilidade (Sorensen, 2008). Atualmente o método padronizado de Penman-Monteith (Allen, et al., 1998; ASCE-EWRI, 2005) é o mais utilizado e reconhecido por pesquisadores para a realização de estudos científicos mais consistentes envolvendo relações hídricas.



O estudo da  $P$  e  $ET_o$  prováveis consiste no ajuste de modelos probabilísticos como funções densidade e probabilidade ( $fdp$ ) às séries históricas de  $P$  e  $ET_o$ , utilizando posteriormente a  $fdp$  de melhor ajuste para estimar a ocorrência dos valores a determinado nível de probabilidade (Jerszurki et al., 2015b; Sampaio et al., 2006; Souza, 2017; Souza, 2018).

Valores de  $P$  e  $ET_o$  prováveis são muito utilizados no planejamento de projetos de irrigação, sendo importantíssimos para locais em que há déficit hídrico (Kunkel et al., 2013). Probabilidades de 75% para precipitação pluviométrica ( $P_{75\%}$ ), e 25% para a evapotranspiração de referência ( $ET_{o25\%}$ ) são as mais indicadas para fins agropecuários, pois garantem a minimização de riscos (Jensen, 1974; Doorenbos & Pruitt, 1977; Saad e Scaloppi, 1988; Frizzzone et al., 2005; Souza, 2017). No entanto, seria importante que os estudos desenvolvidos na área possibilitassem a disponibilização dos valores de  $P$  e  $ET_o$  para qualquer nível de probabilidade, dando maior informação para a utilização, e alternativas para aplicação dos resultados em novos estudos.

O conhecimento e entendimento dos padrões e probabilidades de ocorrência de eventos climáticos como  $P$  e  $ET_o$ , em determinada localidade, possibilita a minimização dos impactos e riscos com o planejamento e projetos agrícolas (Santos et al., 2018). São informações que aumentam a eficiência no uso e manejo hídrico, diminuem riscos climáticos e econômicos, e promovem a economia de água em todo o sistema (Khanmohammadi et al., 2017). Nesse contexto, teve-se por objetivo no presente trabalho determinar os parâmetros da função densidade probabilidade de melhor ajuste e estabelecer a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) e precipitação pluviométrica ( $P$ ) prováveis para o grid regular  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , para o Estado de São Paulo.

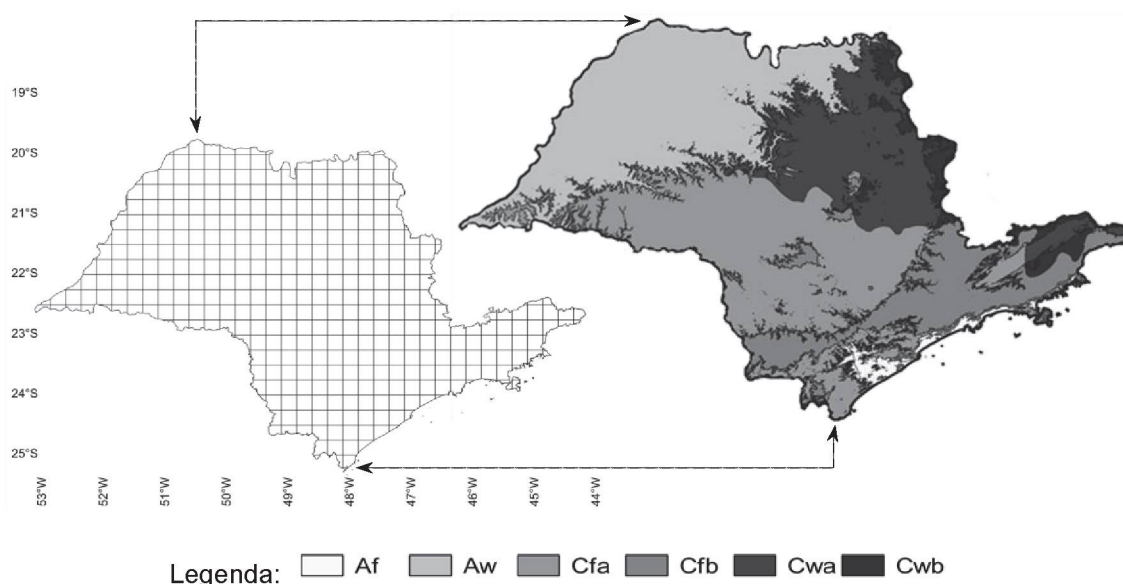
## **2.4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.4.1 Área de estudo**

O presente trabalho de pesquisa foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA) / SCA / UFPR. As análises foram realizadas para o Estado de São Paulo, localizado na região sudeste do Brasil, com área de 248.209 km<sup>2</sup> (FIGURA 2.1). O Estado apresenta seis climas conforme

classificação de Köppen (Álvares et al, 2013), tendo predominância dos climas subtropical úmido (*Cfa*) e savânico de inverno seco (*Aw*). A temperatura média no Estado é de 17,5 °C e a precipitação pluvial média de 1495 mm por ano (CEPAGRI, 2018). O *Cfa* é um clima temperado quente com estações de inverno e verão bem definidas, úmido e com temperatura média superior a 22 °C no mês mais quente. O *Aw* é um clima tropical com presença de chuvas no verão e estação seca de inverno (Álvares et al, 2013).

FIGURA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN E *GRID* REGULAR 0,25° x 0,25° TOTALIZANDO 366 PONTOS ESPACIALIZADOS NO ESTADO DE SÃO PAULO.



*Af* – Equatorial; *Aw* – Savânico; *Cfa* – Subtropical úmido; *Cfb* – Oceânico temperado; *Cwa* – Subtropical úmido (Inverno seco); *Cwb* – Subtropical de altitude.

FONTE: A autora (2020), adaptado de Álvares et al. (2013).

#### 2.4.2 Dados meteorológicos

Os dados espacializados de precipitação pluviométrica (*P*) e evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*) utilizados no presente estudo são de um trabalho realizado por Xavier et al. (2016), em que foi formado um *Grid* regular 0,25° x 0,25° de valores das variáveis, que contabilizam 366 pontos para o Estado de São Paulo (FIGURA 2.1). Foram utilizados dados climáticos de 36 anos, do período de 01 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro 2015, interpolados de valores diários medidos em estações meteorológicas convencionais e automáticas, totalizando 3625 pluviômetros e 735 estações (Xavier et al., 2016). Os dados de precipitação pluviométrica (*P*) foram

disponibilizados pela “Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico” (ANA), vinculada ao Ministério do Desenvolvimento Regional. A evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) foi estimada por Xavier et al. (2016) com o método de Penman-Monteith, conforme recomendado por Allen et al. (1998) e Raes (2012). Os dados climáticos para estimar a  $ET_o$  (temperaturas máxima, mínima e média do ar; umidade relativa do ar; velocidade do vento a 2 m de altura; brilho solar diário) foram disponibilizados pelo “Instituto Nacional de Meteorologia” (INMET), vinculado ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

### 2.4.3 Valores prováveis de precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência

Os cálculos dos valores prováveis foram realizados com o Módulo “Distribuição de frequência, teste de aderência e cálculo de valores prováveis”, desenvolvido nas atividades da Plataforma Moretti (Souza, 2006). Na determinação da probabilidade de ocorrência das  $ET_o$  e  $P$  o Módulo realiza os seguintes passos (Souza et al., 2013):

- i) Agrupamento dos valores diários de evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) e precipitação pluviométrica ( $P$ ) em períodos de dez dias (decêndios). Posteriormente, os valores diários de precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência foram organizados em 37 decêndios por ano (2 variáveis x 37 decêndios x 366 pontos = 27084 séries de dados decendiais). O último decêndio de cada ano foi composto pelos cinco ou seis (em caso de ano bissexto) últimos dias do ano;
- ii) Estabelecimento das distribuições de frequência com os dados das séries observadas, e cálculo dos parâmetros estatísticos das  $fdp$ 's (Exponencial, Gama, Normal, Triangular e Uniforme) com as séries de valores decendiais (27084 distribuições de frequência no total);
- iii) Determinação dos parâmetros estatísticos: alfa e beta para a distribuição Gama; média e desvio padrão para a Normal; maior valor, menor valor e moda para a Triangular; média para a Exponencial; e, maior e menor valor para a Uniforme (Assis, et al., 1996; Bussab & Morettin, 2010). Assim, foram encontrados 650016 parâmetros das  $fdp$ 's testadas {2 (Gama) x 2 (Normal) x 1 (Exponencial) x 3 (Triangular) x 2 (uniforme) x 2 (variáveis:  $P$  e  $ET_o$ ) x 13542 distribuições de frequência}.



- iii) Verificação da aderência das cinco *fdp*'s testadas aos valores decendiais com o teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância. Foram realizados 135420 testes de aderência (2 variáveis x 37 decêndios x 366 pontos x 5 *fdp*'s);
- iv) Escolha da *fdp* que melhor se ajustou a cada decêndio observado. Foram selecionadas 27084 *fdp* de melhor ajuste (2 variáveis x 37 decêndios x 366 pontos);
- v) Determinação dos valores prováveis com determinados níveis de probabilidade de ocorrência: precipitação pluviométrica a 75% de probabilidade ( $P_{75\%}$ ); e, evapotranspiração de referência a 25% de probabilidade ( $ET_{0_{25\%}}$ ). Foram determinados 27084 valores prováveis ( $P_{75\%}$  e  $ET_{0_{25\%}}$ ) com as *fdp* de melhor ajuste para cada ponto e decêndio (2 variáveis x 37 decêndios x 366 pontos).

Na formação dos decêndios com os dados de  $P$ , os dados diários foram tabulados e agrupados separando os decêndios com valor igual à zero (todos decêndios com valor total de  $P$  inferior à 1 mm) dos decêndios com valor diferente de zero. O conceito de distribuição mista foi adotado, visto que algumas *fdp*'s não admitem valores nulos (Assis et al., 1996):

$$F(p) = P_0 + (1 - P_0) \cdot D(p)$$

Sendo:  $F(p)$  – função cumulativa de probabilidade da distribuição mista (adimensional);  $P_0$  – probabilidade de ocorrência de decêndios com valor igual a zero ou com valores menores que 1 mm (adimensional);  $D(p)$  – probabilidade estimada com a distribuição cumulativa teórica de melhor ajuste, cujos parâmetros foram determinados na ausência de decêndios com valor igual a zero (adimensional).

#### a) Cálculo dos valores prováveis de $ET_0$ e $P$

Com a *fdp* analisada que melhor se ajustou à  $ET_0$  e  $P$ , de cada período decendial e localidade do *grid* regular  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  do Estado de São Paulo, foram determinados os valores decendiais prováveis de evapotranspiração de referência a 25% de probabilidade ( $ET_{0_{25\%}}$ ) e precipitação pluviométrica a 75% de probabilidade ( $P_{75\%}$ ):

$$ET_{0_{25\%}} = P(ET_{0_{25\%}} \in ET_0 \mid ET_{0_i} \geq ET_{0_{25\%}}) = 25\%$$

$$P_{75\%} = P(P_{75\%} \in P \mid P_i \geq P_{75\%}) = 75\%$$

## b) Espacialização dos valores prováveis de $ET_{o25\%}$ e $P_{75\%}$ para o Estado de São Paulo

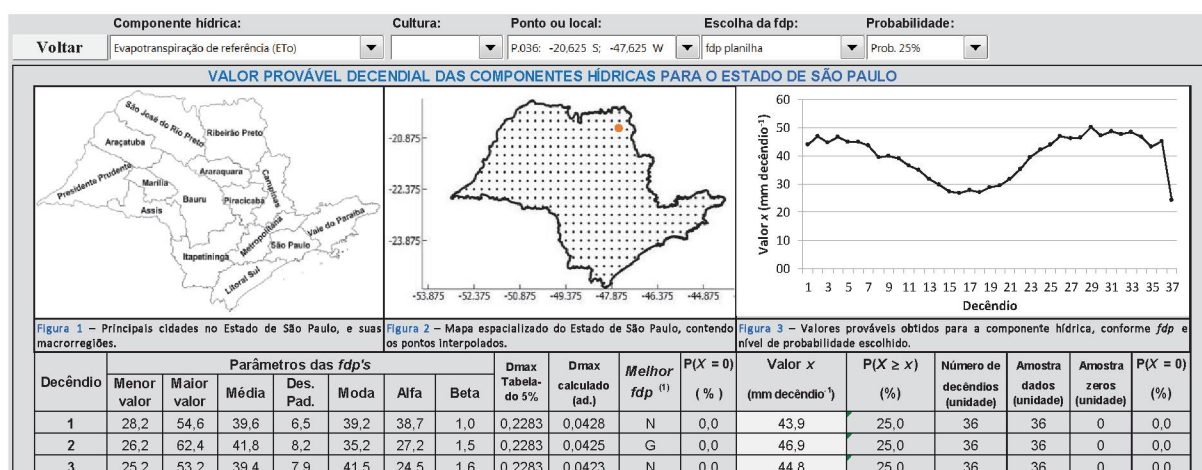
Com os valores decendiais prováveis calculados, foram gerados mapas de evapotranspiração de referência ( $ET_{o25\%}$ ) e precipitação pluviométrica ( $P_{75\%}$ ) prováveis para o Estado de São Paulo. Os mapas foram gerados com o programa estatístico Rstudio® 4.0.

## 2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.5.1 Parâmetros das *fdp's* de melhor ajuste e cálculo do valor provável

Os parâmetros das funções densidade de probabilidade (*fdp's*) de melhor ajuste de cada ponto e decêndio (650016 parâmetros) foram dispostos em uma planilha eletrônica automática desenvolvida para permitir a sua saída/identificação (FIGURA 2.2; APÊNDICE 1), bem como realizar os cálculos dos valores prováveis de  $ET_o$  e  $P$ , para qualquer nível de probabilidade entre 1 e 99%. A matriz de dados constituída poderá contribuir muito para o planejamento em geral das regiões do Estado de São Paulo, auxiliando no fornecimento de dados de  $ET_o$  e  $P$  com o nível de probabilidade mais conveniente para o que se deseja realizar. Os valores prováveis permitem maior confiabilidade no planejamento hídrico agrícola, e o alcance de melhores índices de produtividade, sem desperdício de água (Conde et al., 2016).

FIGURA 2.2 – PLANILHA ELETRÔNICA PARA SAÍDA/IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE MELHOR AJUSTE PARA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ( $ET_o$ ) E PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA ( $P$ ), E CÁLCULO DA PROBABILIDADE DECENDIAL DE OCORRÊNCIA, EM DETERMINADA LOCALIDADE NO ESTADO DE SÃO PAULO.



Fonte: A autora (2020)

### 2.5.2 Funções densidade de probabilidade

Na TABELA 2.1 e FIGURA 2.3 encontram-se as frequências das funções densidade de probabilidade (Normal; Gama; Triangular; Exponencial e Uniforme) de melhor ajuste da  $ET_o$  e  $P$ , para o Estado de São Paulo.

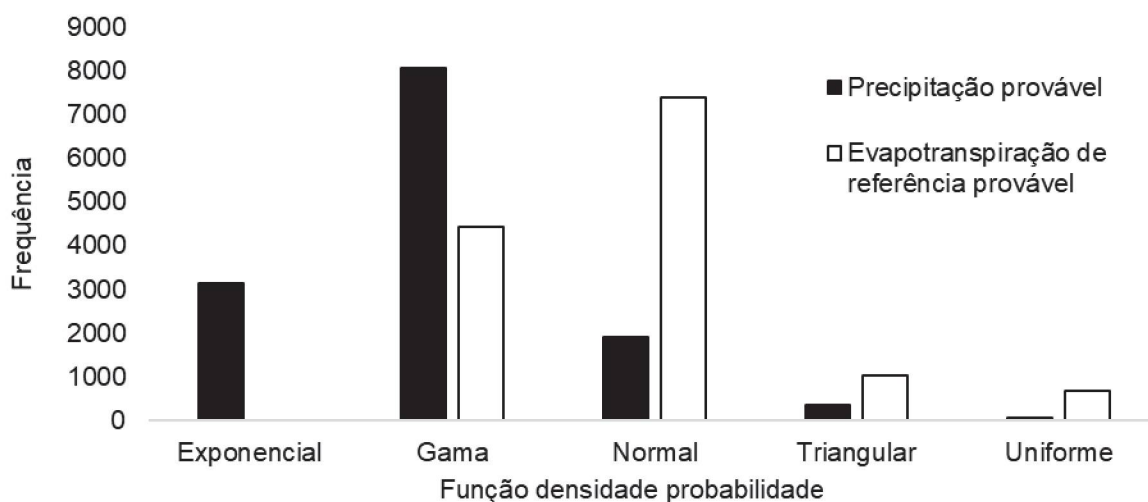
TABELA 2.1 – FREQUÊNCIA DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE (E – EXPONENCIAL; G – GAMA; N – NORMAL; T – TRIANGULAR; U – UNIFORME) DE MELHOR AJUSTE ÀS SÉRIES DECENIAIS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA ( $P$ ) E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ( $ET_o$ ), PARA O ESTADO DE SÃO PAULO.

Decêndios	----- Melhor ajuste para $P$ -----					----- Melhor ajuste para $ET_o$ -----				
	E	G	N	T	U	E	G	N	T	U
1 (01/01 a 10/01)	34	305	18	9	0	0	114	179	56	17
2 (11/01 a 20/01)	2	189	149	23	3	0	125	204	21	16
3 (21/01 a 30/01)	31	267	43	25	0	0	123	181	5	57
4 (31/02 a 09/02)	29	235	94	8	0	0	70	277	5	14
5 (10/02 a 19/02)	3	165	166	27	5	0	84	260	10	12
6 (20/02 a 01/03)	13	237	90	24	2	0	73	242	16	35
7 (02/03 a 11/03)	44	234	70	17	1	0	72	207	83	4
8 (12/03 a 21/03)	10	268	76	11	1	0	134	216	10	6
9 (22/03 a 31/03)	98	131	118	19	0	0	75	217	10	64
10 (01/04 a 10/04)	142	187	29	8	0	0	138	150	16	62
11 (11/04 a 20/04)	128	65	116	51	6	0	177	131	55	3
12 (21/04 a 30/04)	231	114	15	5	1	0	80	245	39	2
13 (01/05 a 10/05)	289	73	4	0	0	0	124	195	6	41
14 (11/05 a 20/05)	195	171	0	0	0	0	127	175	37	27
15 (21/05 a 30/05)	128	236	2	0	0	0	66	237	26	37
16 (31/05 a 09/06)	54	312	0	0	0	0	81	227	42	16
17 (10/06 a 19/06)	73	291	2	0	0	0	123	199	27	17
18 (20/06 a 29/06)	50	316	0	0	0	0	80	245	38	3
19 (30/06 a 09/07)	45	319	2	0	0	0	155	186	25	0
20 (10/07 a 19/07)	113	253	0	0	0	0	134	200	23	9
21 (20/07 a 29/07)	72	294	0	0	0	0	158	142	15	51
22 (30/07 a 08/08)	61	301	2	2	0	0	152	187	21	6
23 (09/08 a 18/08)	36	329	1	0	0	0	78	251	34	3
24 (19/08 a 28/08)	56	310	0	0	0	0	11	239	103	13
25 (29/08 a 07/09)	135	228	3	0	0	0	97	183	75	11
26 (08/09 a 17/09)	234	118	8	6	0	0	170	148	9	39
27 (18/09 a 27/09)	219	139	8	0	0	0	184	159	14	9
28 (28/09 a 07/10)	168	193	4	1	0	0	141	202	23	0
29 (08/10 a 17/10)	213	147	5	1	0	0	161	117	47	41
30 (18/10 a 27/10)	22	225	106	13	0	0	130	182	27	27
31 (28/10 a 06/11)	47	264	49	5	1	0	182	168	14	2
32 (07/11 a 16/11)	4	125	216	19	2	0	128	208	20	10
33 (17/11 a 26/11)	59	140	144	22	1	0	110	227	21	8
34 (27/11 a 06/12)	16	289	39	22	0	0	164	181	10	11
35 (07/12 a 16/12)	6	207	126	18	9	0	172	181	10	3
36 (17/12 a 26/12)	11	167	157	15	16	0	155	189	13	9
37 (27/12 a 31/12)	61	233	56	15	1	0	88	255	22	0
Soma	3132	8077	1918	366	49	0	4436	7392	1028	685
Porcentagem (%)	23,13	59,64	14,16	2,7	0,36	0,0	32,76	54,59	7,59	5,06

FONTE: A autora (2020).



FIGURA 2.3 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DAS *fdp*'s (EXPONENCIAL, GAMA, NORMAL, TRIANGULAR E UNIFORME) QUE MELHOR SE AJUSTARAM AOS VALORES DECENDIAIS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA, PARA O PERÍODO DE 36 ANOS, NOS 37 DECÊNDIOS DO ANO, NO ESTADO DE SÃO PAULO.



FONTE: A autora (2020)

A *fdp* Gama ajustou-se melhor em 59,6% do total dos testes de aderência realizados às distribuições de frequência com valores decendiais de  $P$ . As *fdp*'s Exponencial, Normal, Triangular e Uniforme apresentaram melhor ajuste em 23,1%, 14,2%, 2,7% e 0,4% das distribuições de frequência, respectivamente (TABELA 2.1). Vários autores, nos Estados do Paraná, Bahia, Pernambuco e Rondônia também verificaram a *fdp* Gama com melhor ajuste para valores decendiais de  $P$  (Souza et al., 2014a; Jerszurki et al., 2015a; Santiago et al., 2017; Santos et al., 2018; Silva et al., 2019).

A *fdp* Gama é conhecida por descrever vários tipos de formatos, mas não há evidências de um mecanismo físico que estabeleça que a precipitação pluviométrica se adeque melhor apenas a essa *fdp* (Vlček e Huth, 2009). Alguns autores testaram e encontraram melhor ajuste com outras *fdp*'s (Kim et al., 2019; Park et al., 2019). Dependendo do tipo de evento estudado, outras *fdp*'s se mostraram mais adequadas, como a *fdp* Gumbel para a ocorrência de valores máximos de precipitação (Borges et al., 2016; Lopes et al., 2018).

Para os valores decendiais de  $ET_o$ , a *fdp* Normal teve melhor ajuste em 54,6% do total de testes de aderência aplicados (TABELA 2.1). Gama, Triangular, Uniforme e Exponencial apresentaram melhor ajuste em 32,8%, 7,6%, 5,1% e 0,0% das

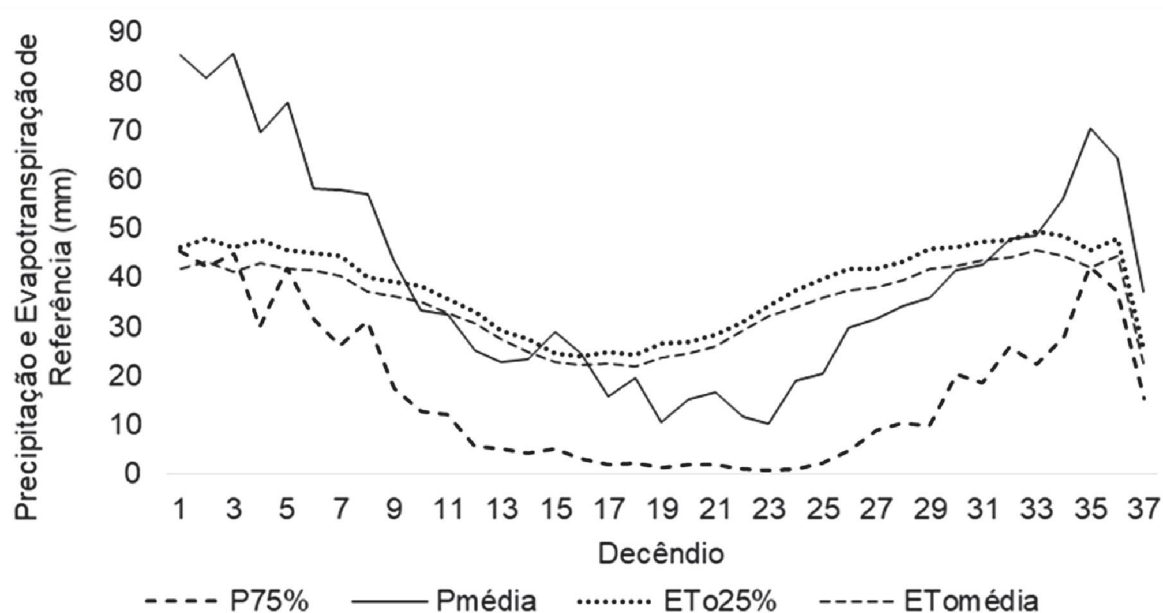
distribuições de frequência, respectivamente. A  $ET_o$  não se ajustou à  $fdp$  Exponencial devido à natureza do evento (Souza, 2017; Gurski, 2018).

No Estado do Paraná e na Europa, autores encontraram resultados semelhantes, apontando que a  $fdp$  Normal se ajusta melhor estatisticamente aos valores de  $ET_o$  (Souza et al., 2014a; Jerszurki et al., 2015b; Piticar et al., 2015). A Normal é considerada uma das  $fdp$ 's contínuas mais importantes (Oliveira, 1970; Wolf, 1962) e mais utilizada para inúmeras variáveis (Souza, 2018).

### 2.5.3 Valores prováveis de $P$

Os valores médios decendiais de precipitação pluviométrica ( $P_{média}$ ) foram, em média, superiores 59% (24 mm) aos valores decendiais de  $P_{75\%}$  em todos os decêndios do ano, respectivamente (FIGURA 2.4). Sistemas hidráulicos ou de irrigação projetados baseando-se na  $P_{média}$  podem subdimensionar equipamentos e tubulações, ocasionando déficit hídrico para as culturas irrigadas no período de maior evapotranspiração e menor precipitação pluviométrica (Jerszurki et al., 2015a; Jerszurki et al. 2015b; Sampaio, et al., 2006; Souza, 2017). Assim, os valores prováveis são mais recomendados para serem utilizados em planejamentos de gestão de recursos hídricos agrícolas (Mello et al., 2015).

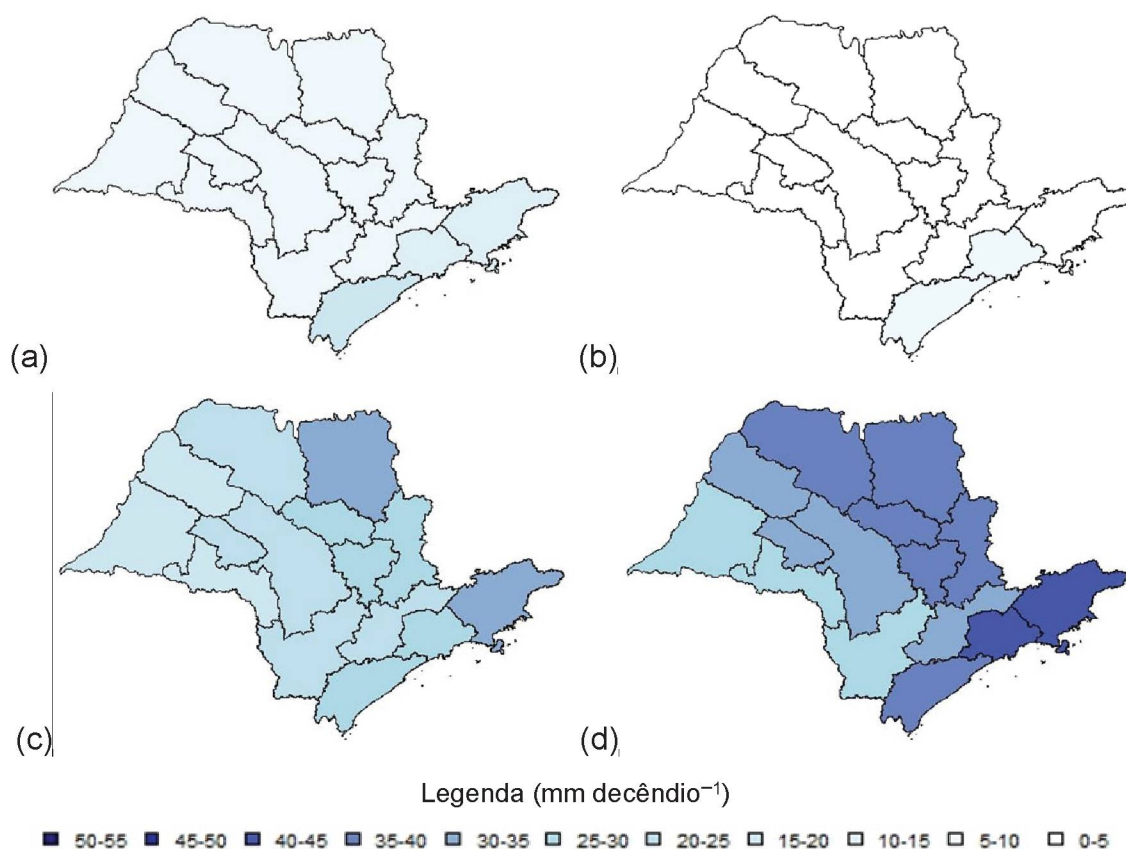
FIGURA 2.4 – VALORES DECENDIAIS DE  $ET_{omédia}$ ,  $ET_{o25\%}$ ,  $P_{média}$  E  $P_{75\%}$ , CONSIDERANDO PERÍODO DE 36 ANOS, NOS 37 DECÊNDIOS DO ANO, NO ESTADO DE SÃO PAULO.



FONTE: A autora, 2019.

Na FIGURA 2.5 encontra-se apresentada para os períodos estacionais (outono, inverno, primavera e verão), no Estado de São Paulo, a precipitação pluviométrica decendial média provável a 75% ( $P_{75\%}$ ; mm decêndio<sup>-1</sup>).

FIGURA 2.5 – PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DECENDIAL MÉDIA PROVÁVEL A 75% ( $P_{75\%}$ ; mm decêndio<sup>-1</sup>) NO ESTADO DE SÃO PAULO, PARA AS ESTAÇÕES: a) OUTONO; b) INVERNO, c) PRIMAVERA; E, d) VERÃO.



FONTE: A autora (2020)

O verão é a estação em que se espera maior ocorrência de chuvas em todo o Estado de São Paulo (FIGURAS 2.4 e 2.5), devido ao avanço de frentes úmidas que favorecem a instabilidade atmosférica e presença de precipitações pluviométricas convectivas que atuam em linhas de instabilidade tropicais. Tal instabilidade já é percebida em meados da primavera, esperando-se aumento na ocorrência de precipitação pluviométrica em todo o Estado (Fontão et al., 2018).

Durante o inverno tem-se queda considerável das chuvas (FIGURAS 2.4 e 2.5). O outono e inverno são épocas em que o tempo se apresenta mais estável e com menos chuvas. Por isso, espera-se estiagens de longo período. Durante as quatro estações, há a influência da massa polar atlântica e da massa tropical atlântica



continental, que favorecem o acúmulo de chuvas no verão e a estiagem no inverno (Fontão et al., 2018).

O Estado de São Paulo apresentou períodos definidos para a  $P_{75\%}$  (FIGURAS 2.4 e 2.5), sendo de até 20 mm decêndio<sup>-1</sup> superior na primavera-verão, entre o 27º (18/09 a 27/09) e o 8º (27/12 a 31/12) decêndio, comparado com o período de outono-inverno, entre o 9º (22/03 a 31/03) e 26º (08/09 a 17/09) decêndio. Conforme mencionado anteriormente, a probabilidade de ocorrência de chuvas no Estado nestes períodos é maior devido à massa de ar equatorial continental predominante (Marcuzzo, 2017).

Os períodos com maior probabilidade de ocorrência de precipitação pluviométrica encontrados no presente estudo (FIGURA 2.5) são similares aos períodos obtidos no estudo de eventos extremos de precipitação pluviométrica para o Estado de São Paulo, realizado por Garcia et al. (2018).

O Estado de São Paulo apresentou maior  $P_{75\%}$  em seu litoral, bem como nas regiões de São José do Rio Preto, Ribeirão Preto, Araquara, Piracicaba e Campinas (FIGURA 2.5). As áreas são as mesmas regiões em que Marcuzzo (2017) encontrou maior ocorrência de precipitação pluviométrica nos trimestres estudados, sendo que as regiões Litorânea e São Paulo se destacaram entre as demais analisadas. O litoral do Estado de São Paulo apresenta menores altitudes, com característica de províncias costeiras, próxima à Serra do Mar, onde há o desenvolvimento de nuvens convectivas (Yaguchi, 2013; Freitas, 2016). Este aspecto faz com que haja maior tendência de ocorrência de tempestades e granizo, conforme observado para o Estado de São Paulo por Abreu et al. (2020) e Mattos et al. (2008).

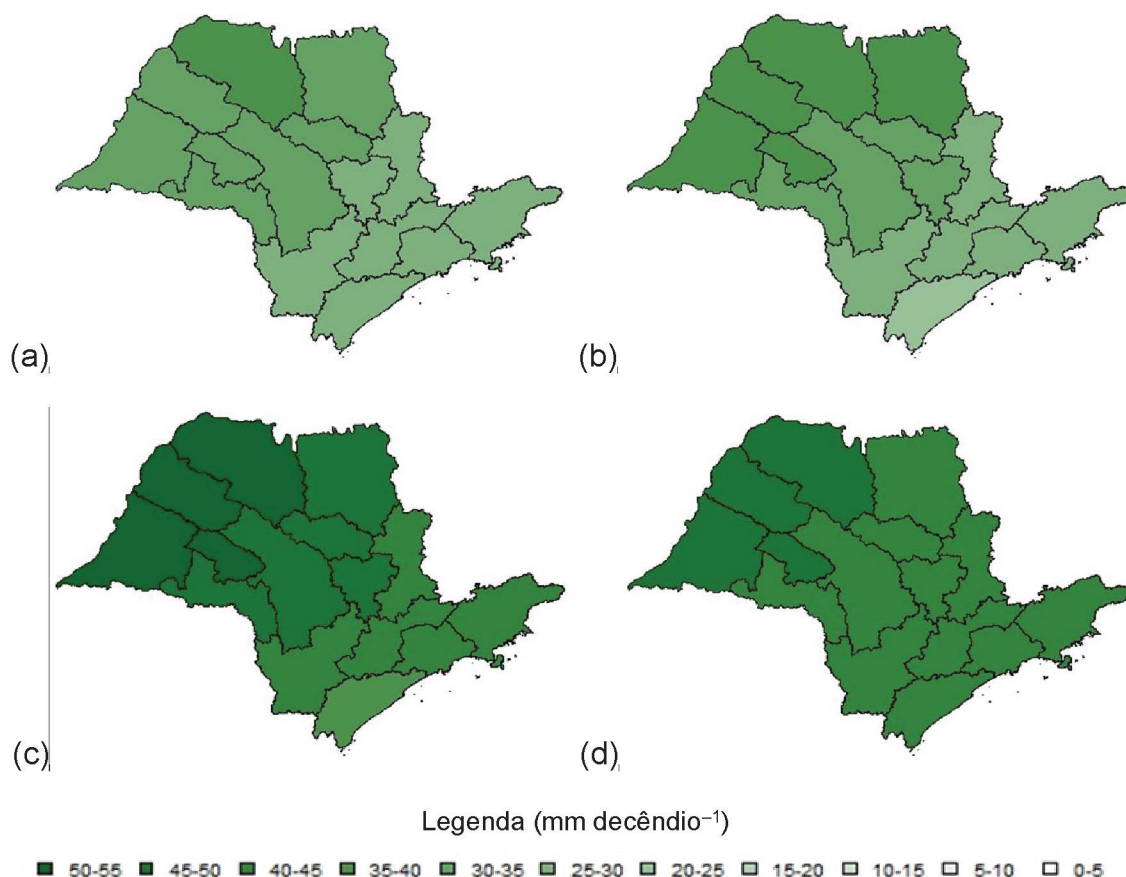
No período outono-inverno, entre o 11º (11/04 a 20/04) e 25º (29/08 a 07/09) decêndios, há maior probabilidade de ausência de precipitação pluviométrica ( $P_o = 0$ ) para todo o Estado de São Paulo (FIGURAS 2.5). O período pode ser crítico para várias culturas agrícolas. Para a cana-de-açúcar não irrigada é crítico principalmente se as deficiências ocorrerem nos três primeiros meses de desenvolvimento da cultura (Souza & Galvani, 2010).

### 2.5.4 Valores prováveis de $ET_o$

Os valores médios decendiais de evapotranspiração de referência ( $ET_{o_{média}}$ ) foram, em média, inferior 9% (3 mm) aos valores decendiais de  $ET_{o_{25\%}}$  em todos os decêndios do ano, respectivamente (FIGURA 2.4). As amplitudes entre os respectivos valores decendiais de " $ET_{o_{25\%}} - P_{75\%}$ " é uma boa maneira para se chegar aos dados necessários para dimensionar adequadamente sistemas de irrigação, e evitar inconvenientes com o super ou sub dimensionamento de equipamentos e tubulações.

Na FIGURA 2.6 estão representados os valores da evapotranspiração de referência decencial média provável a 25% ( $ET_{o_{25\%}}$ ; mm decêndio<sup>-1</sup>), para os períodos estacionais (outono, inverno, primavera e verão), no Estado de São Paulo.

FIGURA 2.6 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DECENCIAL MÉDIA PROVÁVEL A 25% ( $P_{25\%}$ ; mm decêndio<sup>-1</sup>) NO ESTADO DE SÃO PAULO, PARA AS ESTAÇÕES: a) OUTONO; b) INVERNO; c) PRIMAVERA; E, d) VERÃO.



FONTE: A autora (2020)

A Primavera foi a estação em que as  $ET_{o_{25\%}}$  foram mais elevadas (entre 27° e 36° decêndios; 38 a 52 mm decêndio<sup>-1</sup>), principalmente nas regiões de Marília, Presidente Prudente, Araçatuba e São José do Rio Preto (FIGURAS 2.4 e 2.6). No período outono-inverno, mais especificamente entre o 12° (21/04 a 30/04) e 21° (20/07 a 29/07) decêndios, há valores entre 30 e 40 mm decêndio<sup>-1</sup> de  $ET_{o_{25\%}}$  para o centro-norte e entre 20 a 30 mm decêndio<sup>-1</sup> para as regiões sudeste, sul e litoral-sul do Estado de São Paulo. Os resultados concordam com os obtidos por Teixeira et al. (2017), que encontraram valores menores no final da estação chuvosa e crescentes do final de julho ao início de dezembro, para o Estado de São Paulo.

Entre outras variáveis, a  $ET_o$  depende da temperatura e umidade relativa do ar. Logo, quanto menor a temperatura e maior umidade relativa do ar, menor deve ser a demanda atmosférica por água (Conde et al., 2016). A  $ET_o$  também é sensível a mudanças climáticas, principalmente quanto às variações no déficit de vapor d'água, velocidade do vento e radiação solar, para os principais tipos climáticos brasileiros (Jerszurki et al., 2019). Estudos no Estado de São Paulo atestam que  $ET_o$  pode ser estimada somente com dados de entrada de temperatura por redes neurais artificiais, e que a abordagem simplificada de Penman é uma alternativa precisa ao método padrão Penman-Monteith, para estimar a  $ET_o$  no Estado (Nova et al., 2006).

O Estado de São Paulo tem predominância do clima Cwa, subtropical de inverno seco e verão quente (CEPAGRI, 2018). Como o Cwa apresenta bastante variação de temperaturas mínimas e máximas, há maior variabilidade nas  $ET_o$  resultantes entre as estações do ano (FIGURAS 2.4 e 2.6). O período mais sensível é o inverno, por dispor de menos radiação solar, variando em torno de 18% (Jerszurki et al., 2019).

A probabilidade de ocorrência de  $ET_{o_{25\%}}$  foi 10 mm decêndio<sup>-1</sup> menor, em média, nas regiões do litoral e sul do Estado, Metropolitana e Campinas, em comparação com as regiões com as maiores  $ET_{o_{25\%}}$ . Conforme o CEPAGRI (2018), são regiões que apresentam clima Aw tropical, com inverno seco e estação chuvosa no verão. O clima exerce influência na  $ET_o$  (Wang et al., 2017), e cada região apresenta tendência de  $ET_{o_{25\%}}$  conforme cada clima existente.



## 2.6 CONCLUSÕES

A *fdp*'s Gama e Normal, respectivamente, ajustaram-se melhor em aproximadamente 60% e 55% do total dos testes de aderência realizados às distribuições de frequência contendo valores decendiais de  $P$  e  $ET_o$ .

A  $P_{75\%}$  é bem definida no Estado de São Paulo, sendo superior no verão (entre 1º e 9º decêndios; 20 a 53 mm decêndio<sup>-1</sup>) e primavera-verão (entre 29º e 37º decêndios; 15 a 39 mm decêndio<sup>-1</sup>). A região litorânea (sul e sudeste) tem as maiores probabilidades de chuva ao longo do ano, com exceção do inverno. O inverno (entre 18º e 25º decêndios; 0 a 15 mm decêndio<sup>-1</sup>) tem maior probabilidade de ausência de precipitação ( $P_0 = 0$ ).

A  $ET_{o_{25\%}}$  é mais alta na primavera no Estado de São Paulo (entre 27º e 36º decêndios; 38 a 52 mm decêndio<sup>-1</sup>), caindo no outono-inverno (entre 12º e 21º decêndios; 25 a 40 mm decêndio<sup>-1</sup>). As maiores probabilidades de  $ET_{o_{25\%}}$  encontram-se nas regiões norte e noroeste.

## 2.7 REFERÊNCIAS

- ABREU, E.X.; MATTOS, E.V.; SPERLING, V.B. Caracterização das Assinaturas de Radar e da Atividade Elétrica de Relâmpagos de Tempestades com Granizo no Estado de São Paulo. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 2, n. 43, p. 173-188, 2020.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage Paper, Rome, v. 56. 300p. FAO, 1998.
- ÁLVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ASCE-EWRI. **The ASCE standardized reference evapotranspiration equation**. Report of the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Reston: Institute of the American Society of Civil Engineers; 2005.
- ASSIS, F.N.; ARRUDA, H.V.; PEREIRA, A.R. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**. Pelotas: Ed. da UFPel, 1996.
- BORGES, G.M.R.; THEBALDI, M.S. Estimativa da precipitação máxima diária anual e equação de chuvas intensas para o município de Formiga, MG, Brasil. **Ambiente e Água** v. 11, n. 4, p.891-902, 2016. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrograficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1823>.
- BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica**. 6.ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

CAMARGO, F.P.; FREDO, C.E.; GHOBIL, C.N.; BUENO, C.R.F.; BAPTISTELLA, C.S.L.; CASER, D.V.; ANGELO, J.A.; OLIVETTE, M.P.A.; COELHO, P.J.; MARTINS, V.A. Previsões e Estimativas das Safras Agrícolas do Estado de São Paulo, 2º Levantamento, Ano Agrícola 2018/19 e Levantamento Final, Ano Agrícola 2017/18, Novembro de 2018. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, v. 14, n. 2, p.1-13, 2019.

CEPAGRI – CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA. Clima dos municípios paulistas: a classificação climática de Köppen para o Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>> Acesso em: 11 ago. 2018.

CONDE, E.C.; BRITO, R.R.; MONTENEGRO, R.J.V.; ROMÁN, R.M.S. Comportamento temporal da evapotranspiração de referência em municípios de São Paulo e Províncias de Cuba. **Irriga**, v. 21, n. 2, p. 365-383, 2016. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2016v21n2p365-383>.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 144p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 24).

FONTÃO, P.A.B.; ZAVATTINI, J.A.; SHERIDAN, S.C.; ARMOND, N.B. Gênese das chuvas em São Paulo (SP): estudo comparativo entre a "Spatial Synoptic Classification" e a "Análise Rítmica em Climatologia". **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, p. 267-288, 2018. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v23i0.58657>.

FREITAS, S.F. Atividade elétrica e precipitação de monção no Estado de São Paulo no período 2008-2011. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

FRIZZONE, J.A.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SOUZA, J.L.M.; ZOCOLER, J.L. **Planejamento de irrigação: análise de decisão de investimento**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005.

GARCIA, J.R.; MIYAMOTO, B.C.B.; MAIA, A.G. Eventos extremos de precipitação: identificação e análise da bacia hidrográfica do Rio Jundiá, São Paulo. Confins. **Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, n. 37, 2018.

GURSKI, B.C. Componentes hídricas prováveis e zoneamento de risco agroclimático para o Estado do Paraná. Curitiba, 2018. 132p. Tese (Doutorado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

JENSEN, M.E. **Design and operation of farm irrigation systems**. New York: American Society of Agricultural Engineers, 1974.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J.L.M.; EVANGELISTA, A.W.P. Distribuição de probabilidade e movimento temporal da precipitação na região de Telêmaco Borba, Paraná. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 1, p. 110-116, 2015a.



JERSZURKI, D.; SOUZA, J.L.M.; EVANGELISTA, A.W.P. Probabilidade e variação temporal da evapotranspiração de referência na região de Telêmaco Borba – PR. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 33, n. 2, p. 118-129, 2015b.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J.L.M.; SILVA, L.C.R. Sensitivity of ASCE-Penman-Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. **Climate Dynamics**, p.1-14, 2019. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-019-04619-1>

KHANMOHAMMADI, N.; REZAIE, H.; MONTASERI, M.; BEHMANESH, J. Regional probability distribution of the annual reference evapotranspiration and its effective parameters in Iran. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 134, n. 1-2, p.411-422, 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-017-2283-6>.

KIM, Y.; KIM, H.; LEE, G.; MIN, K. A Modified Hybrid Gamma and Generalized Pareto Distribution for Precipitation Data. **Asia-pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 55, n. 4, p. 609-616, 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13143-019-00114-z>.

KUNKEL, K.E.; KARL, T.R.; EASTERLING, D.R.; REDMOND, K.; YOUNG, J.; YIN, X.; HENNON, P. Probable maximum precipitation and climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 7, p.1402-1408, 12 abr. 2013. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50334>.

LOPES, A.R.; GIAROLA, C.M.; DOTTO, M.; CARVALHO, A.F.G.; FREDDO, A.R.; XAVIER, E. Utilização de diferentes distribuições de probabilidade para precipitações máximas no município de Francisco Beltrão/PR. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 7, p. 3090 – 3095, 2018.

MARCUZZO, F.F.N. Distribuição espacial da precipitação pluviométrica trimestral na bacia do Ribeirão Bonito, Lajeado em Penápolis e Glicério no Estado de São Paulo. In: XVIII SBSR, 2017.

MATTOS, E.V.; BARBOSA, S.; PEREIRA NETO, A.V.; RUSSO, L.; ALTAMIRANO, R.A.; FENANDEZ, J.P.R. **Avaliação das simulações numéricas de um tornado no setor central do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial. 2008.

MELLO, Y.; KOHLS, W.; OLIVEIRA, T.M.N. análise da precipitação mensal provável para o município de Joinville (SC) e região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 246-258, 2015. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v17i0.42975>.

NOVA, N.A.V.; MIRANDA, J.H.; PEREIRA, A.B.; SILVA, K.O. Estimation of the potential evapotranspiration by a simplified penman method. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 3, p. 713-721, 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162006000300007>

OLIVEIRA, L.M. **Distribuições Estatísticas**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1970.



PARK, J.; SUNG, J.H.; LIM, Y.; KANG, H. Introduction and application of non-stationary standardized precipitation index considering probability distribution function and return period. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 136, n. 1-2, p. 529-542, 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-018-2500-y>.

PITICAR, A.; MIHĂILĂ, D.; LAZURCA, L.G.; BISTRICEAN, P.; PUȚUNTICĂ, A.; BRICIU, A. Spatiotemporal distribution of reference evapotranspiration in the Republic of Moldova. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 124, n. 3-4, p.1133-1144, 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-015-1490-2>.

RAES, D. The ETo Calculator. Rome: FAO, 2012.

SAAD, J.C.C.; SCALOPPI, E.J. Análise dos principais métodos climatológicos para estimativa da evapotranspiração. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, n. 8, 1988, Florianópolis, Anais... Florianópolis: ABID, v.2, p.1037-1052, 1988.

SAMPAIO, S.C.; LONGO, A.J.; QUEIROZ, M.M.F.; GOMES, B.N.; BOAS, M.A.V.; SUSZEK, M. Estimativa e distribuição da precipitação mensal provável estimativa no Estado do Paraná. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences*, v. 28, n. 2, p.267-272, 2006. Universidade Estadual de Maringá. <http://dx.doi.org/10.4025/actascihumansoc.v28i2.169>.

SANTIAGO, E.J.P.; OLIVEIRA, G.M.; LEITÃO, M.M.V.B.R.; MOURA, M.S.B.; GONÇALVES, I.S. Precipitação esperada, em diferentes níveis de probabilidade, na região de Juazeiro, BA. **Journal of Environmental Analysis And Progress**, v. 2, n. 4, p.457-464, 2017. Journal of Environmental Analysis and Progress - JEAP. <http://dx.doi.org/10.24221/jeap.2.4.2017.1462.457-464>.

SANTOS, R.S.; VIEIRA, P.D.; EVANGELISTA, D.H.R.; OLIVEIRA, L.J.C.; NONATO, D. Caracterização de Extremos Mensais de Precipitação em Cacoal (RO). **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 22, n. 14, p.267-280, 2018.

SILVA, E.G.F.A.; POLYCARPO, J.S.M.; MÉLO, R.F.; MOUSINHO, F.H.G.; OLIVEIRA FILHO, J.E.; CORREA, M.M. Determinação de precipitação provável mensal para o município de Goiana-PE. **Revista Geama**, v. 5, n. 1, p. 41-46, 2019.

SORENSEN, M.L. (ed.) **Agricultural water management trends**. New York: Nova Science Publishers, 2008. ISBN 978-60692-455-6

SOUZA J.L.M., JERSZURKI D., DAMAZIO E.C. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 7, p.693-702, 2013.

SOUZA, D.O.; OLIVEIRA, F.G.; CASTRO, I.L.; SOARES, J.B.S.; REIS, M.M.; FIGUEIREDO, F.P. Frequência de ocorrência de precipitação pluviométrica em Montes Claros-MG. **Agrarian**, v. 11, n. 42, p. 337-342, 2018. Universidade Federal de Grande Dourados. <http://dx.doi.org/10.30612/agrarian.v11i42.4175>.

SOUZA, I.A.; GALVANI, E. Clima e produtividade da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Campo Mourão, PR, sul do Brasil. Coimbra, Portugal, In: VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física e II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física, 2010.

SOUZA, J.L.M **Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados**: aplicado às ciências agrárias. Curitiba, Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2018. (Manual didático).

SOUZA, J.L.M. Programa MORETTI – Módulo: Distribuição de frequência, teste de aderência e cálculo de valores prováveis, Versão 2.0, 2005(b). Curitiba: UFPR/SCA/DSEA. 2006.

SOUZA, J.L.M.; GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, n. 2, p. 153-163, 2008.

SOUZA, J.L.M.; JERSZURKI, D.; SCHAFER, R.F.; GURSKI, B.C.; SCHAFER, H. Balanço hídrico climatológico: precipitação e evapotranspiração de referência estimadas com metodologia alternativa. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, n. 13, p. 284-298, 2017.

SOUZA, J.L.M.; JERSZURKI, D.; SIGUIFRID, G. Precipitação e evapotranspiração de referência prováveis na região de Ponta Grossa-PR. **Irriga**, v. 19, n. 2, p. 279-291, 2014a.

SOUZA, J.M.; PEREIRA, L.R.; RAFAEL, A.M.; SILVA, L.D.; REIS, E.F.; BONOMO, R. Comparison of methods for estimating reference evapotranspiration in two locations of Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 8, n. 2, p.114-126, 2014b.

SOUZA, J.L.M. **Ciclo da água na agricultura**: fundamentos para o estudo do sistema solo-planta-atmosfera. Curitiba: Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2017. (Manual didático)

TEIXEIRA, A.H.C.; LEIVAS, J.F.; SILVA, G.B.S. Índices de seca para o Estado de São Paulo através do uso conjunto de imagens MODIS e estações climáticas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. Anais... Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017.

VLČEK, O.; HUTH, R. Is daily precipitation Gamma-distributed? **Atmospheric Research**, v. 93, n. 4, p. 759-766, ago. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.03.005>.

WANG, Z.; XIE, P.; LAI, C.; CHEN, X.; WU, X.; ZENG, Z.; LI, J. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and contributing climatic factors in China during 1961–2013. **Journal of Hydrology**, v. 544, p.97-108, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.021>.

WOLF, F.L. **Elements of probability and statistics**. New York: Mcgraw-hill Book Company, 1962.

XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**. v. 36, p. 2644–2659, 2016.

YAGUCHI, S.M. Simulação em alta resolução do ciclo diurno da precipitação em região de topografia complexa. 2013. 126 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.



### 3 CAPÍTULO III – BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA PROVÁVEL PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO

#### 3.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente estudo determinar séries diárias de componentes do balanço hídrico agrícola (*BHA*) para a cultura da cana-de-açúcar, com o modelo *AquaCrop*, encontrar os parâmetros da função densidade de probabilidade de melhor ajuste destas componentes e calcular os valores prováveis decendiais de armazenamento de água no solo na zona da raiz (*Arm*), deficiência hídrica (*Def*), evapotranspiração da cultura (*ETc*), evapotranspiração real (*ETr*) e excedente hídrico (*Exc*), em todo o Estado de São Paulo. Os dados meteorológicos espacializados utilizados são um *grid* regular  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , com uma série histórica de 36 anos, do período de 01 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro 2015. O cálculo do *BHA* foi realizado com o modelo água-cultura *AquaCrop*, versão 6.1, disponibilizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO). Os dados foram agrupados em períodos decendiais, e com as funções de densidade probabilidade (*fdp*'s) Exponencial, Gama, Normal, Uniforme e Triangular que melhor se ajustaram às séries decendiais das componentes hídricas, determinou-se os valores de *Arm* a 75% de probabilidade ( $Arm_{75\%}$ ), e *Def*, *ETc*, *ETr* e *Exc* a 25% de probabilidade ( $Def_{25\%}$ ,  $ETc_{25\%}$ ,  $ETr_{25\%}$  e  $Exc_{25\%}$ ). Foram gerados mapas das componentes hídricas prováveis com o programa RStudio versão 4.0. A *fdp* Gama apresentou o melhor ajuste (51%, em média) aos valores decendiais das componentes hídricas *ETc*, *Def*, *ETr* e *Exc*. A *fdp* Normal apresentou melhor ajuste (36%) aos valores decendiais de *Arm*. Devido ao pouco ajuste encontrado para componentes hídricas estudadas, as *fdp*'s Uniforme (2%) e Triangular (4%) podem ser desconsideradas em estudos futuros de componentes hídricas. Espera-se valores de  $ETc_{25\%}$  inferiores a 10 mm decêndio<sup>-1</sup> no inverno e de até 36 mm decêndio<sup>-1</sup> no verão. Espera-se  $Arm_{75\%}$  de até 70 mm no verão, e valores de até 120 mm nas demais estações. Espera-se valores superiores de  $Exc_{25\%}$  durante o verão, com maior probabilidade de sua ausência ( $Exc = 0$ ) durante inverno nas regiões de Araçatuba, Araraquara, São José do Rio Preto, Ribeirão Preto e Piracicaba. De modo geral, a primavera é um período favorável para o cultivo da cana-de-açúcar nas principais regiões do Estado de São Paulo. O verão é o período em que se espera maior consumo de água pela cultura ao longo do ciclo, que pode ser prejudicada pela falta de água disponível. O  $Arm_{75\%}$  no inverno é muito baixo nas regiões de Araçatuba e Araraquara, sendo que os resultados obtidos demonstram que a cultura sofrerá com a baixa disponibilidade hídrica no período.

Palavras-chave: AquaCrop. Componentes hídricas. Função densidade de probabilidade. Probabilidade.



### 3.2 ABSTRACT

The aim of the present study was to determine daily series of components of the agricultural water balance (*AWB*) for the sugarcane crop with AquaCrop model, as well as calculating the probable ten-day values of water storage in the root zone (*Arm*), water deficit (*Def*) crop evapotranspiration (*ETc*), real evapotranspiration (*ETr*) and water surplus (*Exc*) for the regular *grid*  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  throughout São Paulo State. This research was carried out at the Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas / SCA / UFPR. The spatialized meteorological data used are from a regular  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  *grid* created for São Paulo State, with a historical series of 36 years, from January 1<sup>st</sup>, 1980 to December 31<sup>st</sup>, 2015. The *AWB* calculation for sugarcane crop was carried out with the water-culture model AquaCrop, version 6.1, provided by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The *AWB* was calculated using 36-year series of daily data for the regular *grid*  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  throughout São Paulo State. The data was grouped in ten-day periods, and with the probability density functions (*pdfs*) Exponential, Gamma, Normal, Uniform and Triangular that best fit in each ten-day period of the water components was determined the probable ten-day values of *Arm* at 75% probability ( $Arm_{75\%}$ ), and *Def*, *ETc*, *ETr* and *Exc* at 25% probability ( $Def_{25\%}$ ,  $ETc_{25\%}$ ,  $ETr_{25\%}$  and  $Exc_{25\%}$ ). Maps of the probable water components were generated with RStudio version 4.0. The *pdf* Gamma showed the best adjustment (51%, on average) to the ten-day period values of the water components *ETc*, *Def*, *ETr* and *Exc*. The Normal *pdf* showed the best adjustment (36%) to the ten-day period values for *Arm*. Due to the little adjustment found for the water components studied, the Uniform (2%) and Triangular (4%) *pdfs* can be disregarded in future studies of water components. Values of  $ETc_{25\%}$  are expected to be less than 10 mm ten-day period<sup>-1</sup> in winter and up to 36 mm ten-day period<sup>-1</sup> in summer.  $Arm_{75\%}$  is expected up to 70 mm in summer, and values up to 120 mm in other seasons. Higher  $Exc_{25\%}$  values are expected during the summer, with a greater likelihood of their absence ( $Exc = 0$ ) during winter in the regions of Araçatuba, Araraquara, São José do Rio Preto, Ribeirão Preto and Piracicaba. In general, the spring is a favorable period for the cultivation of sugar cane in the main regions of São Paulo State. Summer is the period when the highest water consumption is expected by the crop throughout the cycle and may be affected by the lack of available water. In the winter,  $Arm_{75\%}$  is very low in the regions of Araçatuba and Araraquara, and the results obtained show that the crop will suffer from low water availability in this period.

Key-Words: AquaCrop. Water components. Probability density function. Probability.

### 3.3 INTRODUÇÃO

O estado de São Paulo foi responsável por 51% da produção nacional de cana-de-açúcar em 2020 (IBGE, 2020). A cultura ocupa grande parte territorial no Estado (20%), com um total de mais de 5000 ha destinados ao seu cultivo, na safra 2018/19 (IBGE, 2018).

A cana-de-açúcar necessita de grande quantidade de água para o seu cultivo, podendo chegar a 2500 mm por ciclo, consumidos principalmente em sua fase vegetativa (Cardozo et al., 2018; MAPA, 2018a; MAPA, 2018b; Doorenbos & Kassam, 2000). Mesmo sendo tolerante, o estresse hídrico pode influenciar o desenvolvimento da cultura em qualquer fase do seu desenvolvimento. (Casaroli et al., 2019).

A demanda hídrica das culturas varia de acordo com a estação. A água no solo deve estar disponível em quantidades suficientes para o bom desenvolvimento da planta durante todo o período de cultivo. Para determinar se o fluxo de água disponível é suficiente para a cana-de-açúcar no local e período de cultivo, faz-se o estudo do balanço hídrico agrícola (*BHA*; Waller & Yitayew, 2016). Como maior produtor nacional (IBGE, 2020), a determinação do *BHA* é fundamental para o cultivo da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, pois define as condições hídricas em que a planta se desenvolve (Reichardt & Timm, 2020).

Neste contexto, a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) desenvolveu um modelo água-cultura, denominado AquaCrop, que está obtendo excelentes resultados em estudos envolvendo o cálculo das componentes hídricas do *BHA*, bem como para estimar as produtividades de culturas agrícolas (Gurski, 2018; Boudhina et al., 2019; Coelho, 2019; Hellal et al., 2019; Masasi et al., 2019; Sallah et al., 2019; Silvestre et al., 2019; López-urrea et al., 2020).

A utilização de modelos como o AquaCrop, facilitando a obtenção de dados com a simulação de séries de cultivos da cana-de-açúcar, podem possibilitar a realização do estudo provável das componentes hídricas de saída do *BHA*, sendo importante para o planejamento agrícola.

O conhecimento das componentes hídricas prováveis do *BHA* é decisivo para o planejamento agrícola, pois possibilita a mitigação dos efeitos negativos ao encontrar soluções apropriadas, como o planejamento da irrigação (Gale et al., 1972). Ao identificar que a probabilidade de disponibilidade de água no solo é baixa para a

planta, atrelada com a probabilidade de haver alta evapotranspiração, possibilita-se o planejamento e antecipação de manejo a fim de evitar o déficit hídrico para o cultivo (Souza et al., 2013). Para isso realiza-se o tratamento estatístico das séries de componentes hídricas de saída do *BHA*, identificam-se as funções densidade de probabilidade (*fdp's*) de melhor ajuste, seus parâmetros, o que possibilita o cálculo dos valores prováveis compatíveis ao nível de risco para a finalidade de projeto ou planejamento (Gurski, 2018)

Estudos indicam que as probabilidades de 75% para Armazenamento de água na zona da raiz ( $Arm_{75\%}$ ), e 25% para deficiência hídrica ( $Def_{25\%}$ ), evapotranspiração da cultura ( $ET_{c_{25\%}}$ ), evapotranspiração real ( $ET_{r_{25\%}}$ ) e excedente hídrico ( $Exc_{25\%}$ ) são as mais recomendadas para fins agrícolas (Doorenbos & Pruitt, 1977; Saad e Scaloppi, 1988; Frizzone et al., 2005; Gurski, 2018).

Nesse contexto, teve-se por objetivo determinar séries diárias de componentes do balanço hídrico agrícola (*BHA*) para a cultura da cana-de-açúcar, com o modelo *AquaCrop*, encontrar os parâmetros da função densidade de probabilidade de melhor ajuste destas componentes e calcular os valores prováveis decendiais de armazenamento de água no solo na zona da raiz (*Arm*), deficiência hídrica (*Def*), evapotranspiração da cultura (*ET<sub>c</sub>*), evapotranspiração real (*ET<sub>r</sub>*) e excedente hídrico (*Exc*), para o *grid* regular 0,25° x 0,25°, em todo o Estado de São Paulo.

### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

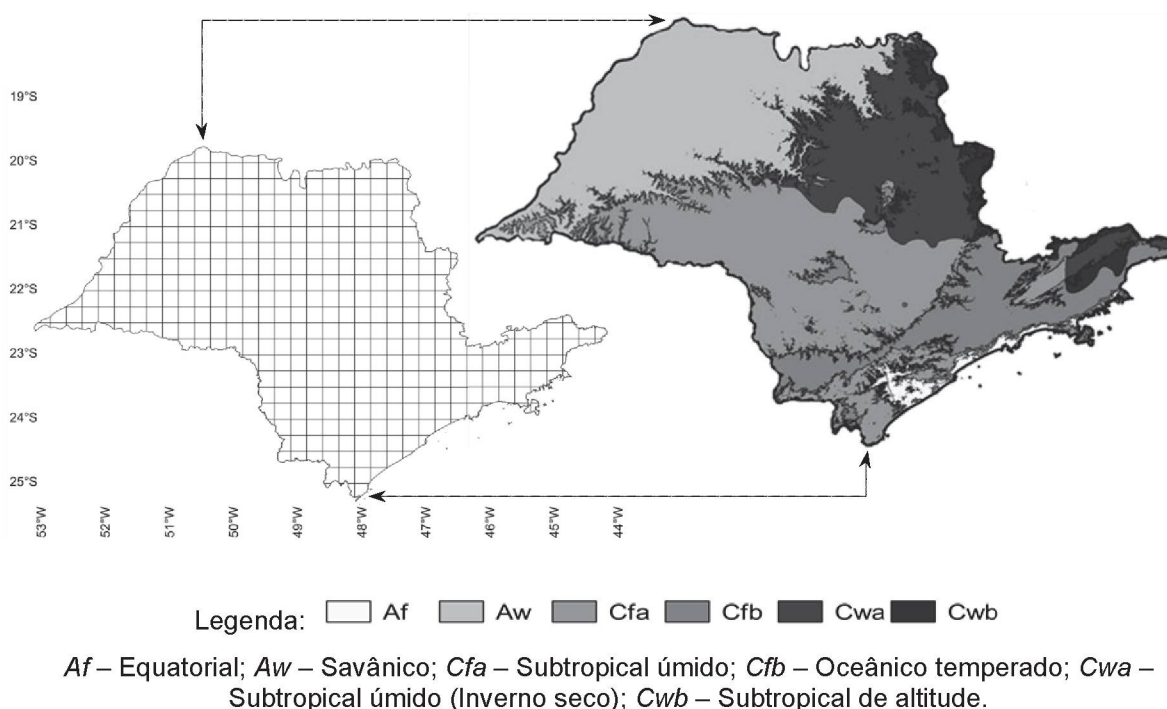
#### 3.4.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas / SCA / UFPR. As análises foram realizadas para o Estado de São Paulo, localizado na região sudeste do Brasil, com área de 248.209 km<sup>2</sup>. O Estado apresenta seis climas conforme classificação de Köppen (Álvares et al, 2013), tendo predominância dos climas: Subtropical úmido (*Cfa*) na região central (FIGURA 3.1), sendo um clima temperado quente com estações de inverno e verão bem definidas, úmido e com temperatura média > 22 °C no mês mais quente; e, Savânico de inverno seco (*Aw*) no noroeste do estado (FIGURA 3.1), sendo um clima tropical com presença de chuvas no verão e estação seca de inverno (Álvares et al, 2013). A temperatura média fica



em torno de 17,5° C e precipitação pluvial média de 1495 mm por ano (CEPAGRI, 2018).

FIGURA 3.1 – *GRID* REGULAR 0,25° x 0,25° E CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN DO ESTADO DE SÃO PAULO.



FONTE: A autora (2020), adaptado de Álvares et al. (2013).

### 3.4.2 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos espacializados utilizados são do trabalho realizado por Xavier et al. (2016), em que foi constituído um *grid* regular 0,25° x 0,25° (FIGURA 3.1). Foram utilizados dados climáticos de 36 anos, do período de 01 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro 2015, interpolados de valores diários medidos em estações meteorológicas convencionais e automáticas. Foram utilizados dados de temperatura máxima ( $T_{max}$ ; °C) e mínima ( $T_{min}$ ; °C) do ar, umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), velocidade do vento a 2 m de altura ( $u_2$ , m s<sup>-1</sup>), precipitação pluviométrica ( $P$ ; mm) e radiação solar incidente diária ( $R_s$ , MJ m<sup>-2</sup>; Xavier et al., 2016). Os dados de precipitação pluviométrica ( $P$ ) foram disponibilizados pela “Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico” (ANA), vinculada ao Ministério do Desenvolvimento Regional” (ANA), e os demais dados pelo “Instituto Nacional de Meteorologia” (INMET), vinculado ao Ministério da Pesquisa, Pecuária e Abastecimento.

### 3.4.3 Cálculo do balanço hídrico agrícola

O cálculo do balanço hídrico agrícola para a cultura da cana-de-açúcar foi realizado com o modelo água-cultura AquaCrop, versão 6.1, disponibilizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (Raes et al., 2018). O BHA foi calculado encontrando-se séries de 36 anos de dados diários. Dos 28 dados de saída do AquaCrop, foram utilizados o armazenamento de água no solo na zona da raiz ( $Arm$ ), deficiência hídrica ( $Def$ ), evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), evapotranspiração real ( $ET_r$ ) e excedente hídrico ( $Exc$ ).

Para utilizar o *software* AquaCrop foi necessário a inclusão dos dados de clima, cultura, solo e manejo:

- i) Clima: As variáveis climáticas de entrada foram  $T_{max}$  e  $T_{min}$  diárias do ar ( $^{\circ}C$ ),  $P$  e  $ET_o$  ( $mm\ dia^{-1}$ ), além da concentração de  $CO_2$  na atmosfera (ppm), que foi estabelecida conforme o manual do modelo AquaCrop. A  $ET_o$  foi estimada por Xavier et al. (2016) com o método Penman-Monteith, conforme recomendado por Allen et al. (1998) e Raes (2012);
- ii) Cultura: As variáveis referentes à cultura foram consideradas conforme os dados utilizados na calibração do *software* para a cultura da Cana-de-açúcar, realizada por Alencar (2014) (TABELA 3.1);
- iii) Solo: Foram utilizados como entrada parâmetros físico-hídricos de quatorze solos representativos do Estado de São Paulo, conforme disponível no banco de dados HYBRAS (Vieira & Klein 2007; Ottoni, 2018; Pilatti, 2018; Sartori, 2010). Os solos utilizados e valores dos parâmetros considerados (umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente, capacidade de campo e saturação; e condutividade hidráulica saturada do solo) estão apresentados no APÊNDICE 2;
- iv) Manejo: A presença e tipo de cobertura do solo, irrigação e fertilização não foram considerados nas análises de simulação. Não foram considerados estresses decorrentes por salinidade e fertilidade.

TABELA 3.1 – PARÂMETROS DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA COM O *SOFTWARE* AQUACROP, PARA O ESTADO DE SÃO PAULO.

Especificação para a cana-de-açúcar	Parâmetro
-------------------------------------	-----------

Temperatura Basal	17,5 °C
Temperatura Máxima	38 °C
Área foliar por plântula na emergência de 90%	20 cm <sup>2</sup>
Coefficiente de cultura para transpiração quando CC = 100%	1,1
Coefficiente de declínio do dossel	4% dia <sup>-1</sup>
Coefficiente de redução do coeficiente de cultura para transpiração	0,3 (Cana Planta) e 0,4 (Cana Soca)
Limite superior da depleção da água no solo para a expansão do dossel	0,25
Limite inferior da depleção da água no solo para a expansão do dossel	0,57
Fator forma para o coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel	3
Limite superior da depleção da água no solo para controle estomático	0,5
Fator forma para o coeficiente de estresse hídrico para o fechamento estomático	3
Limite superior da depleção da água no solo para a senescência do dossel	0,64
Fator forma para o coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel	5
Fator forma da curva de crescimento do sistema radicular	1,3
Mínimo de graus-dias necessários para a produção total biomassa total	10 °C dia <sup>-1</sup>

FONTE: Adaptado de Alencar (2014).

#### 3.4.4 Valores prováveis das componentes do balanço hídrico agrícola para o Estado de São Paulo

Os cálculos dos valores prováveis foram realizados com o Módulo “Distribuição de frequência, teste de aderência e cálculo de valores prováveis, desenvolvido por Souza (2006). Na determinação da probabilidade de ocorrência das componentes de saída do BHA (*ETc*, *Arm*, *ETr*, *Def* e *Exc*), o Módulo utilizado da Plataforma Moretti realiza os seguintes passos (Souza et al., 2013):

- i) Agrupamento dos valores diários de *ETc*, *Arm*, *ETr*, *Def* e *Exc* em períodos de dez dias (decêndios). Posteriormente, os valores diários foram organizados em 37 decêndios por ano. O último decêndio de cada ano foi composto pelos cinco ou seis (em caso de ano bissexto) últimos dias do ano;
- ii) Estabelecimento das distribuições de frequência com os dados das séries observadas e, cálculo dos parâmetros estatísticos. As *fdp*'s testadas com as séries de valores decendiais foram: Exponencial, Gama, Normal, Triangular e Uniforme. Foram determinados os parâmetros estatísticos: média para a Exponencial; alfa e beta para a distribuição Gama; média e desvio padrão para a Normal; maior valor, menor valor e moda para a Triangular; e, maior e menor valor para a Uniforme (Assis et al., 1996; Bussab & Morettin, 2010);
- iii) Verificação da aderência das cinco *fdp*'s testadas aos valores decendiais com o teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância;



- iv) Escolha da *fdp* que melhor se ajustou a cada decêndio observado; e,
- v) Determinação dos valores prováveis com determinados níveis de probabilidade de ocorrência.

Na formação dos decêndios, os dados foram tabulados e agrupados separando os decêndios com valor igual à zero (todos decêndios com valor total inferior à 1 mm) dos decêndios com valor diferente de zero.

O conceito de distribuição mista foi adotado, visto que algumas *fdp*'s não admitem valores nulos (Assis et al., 1996):

$$F(p) = P_o + (1 - P_o) \cdot D(p)$$

Sendo:  $F(p)$  – função cumulativa de probabilidade da distribuição mista (adimensional);  $P_o$  – probabilidade de ocorrência de decêndios com valor igual a zero (adimensional) ou com valores menores que 1 mm;  $D(p)$  – probabilidade estimada com a distribuição cumulativa teórica de melhor ajuste, cujos parâmetros foram determinados na ausência de decêndios com valor igual a zero (adimensional).

Com a *fdp* analisada que melhor se ajustou às séries de  $ETc$ ,  $Arm$ ,  $ETr$ ,  $Def$  e  $Exc$  em cada decêndio, foram determinados os valores decendiais prováveis de  $Arm_{75\%}$ ,  $Def_{25\%}$ ,  $ETc_{25\%}$ ,  $ETr_{25\%}$  e  $Exc_{25\%}$  para cada localidade do *grid* regular  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  do Estado de São Paulo.

$$Arm_{75\%} = P(Arm_{75\%} \in Arm | Arm_i \geq Arm_{75\%}) = 75\%$$

$$ETc_{25\%} = P(ETc_{25\%} \in ETc | ETc_i \geq ETc_{25\%}) = 25\%$$

$$ETr_{25\%} = P(ETr_{25\%} \in ETr | ETr_i \geq ETr_{25\%}) = 25\%$$

$$Def_{25\%} = P(Def_{25\%} \in Def | Def_i \geq Def_{25\%}) = 25\%$$

$$Exc_{25\%} = P(Exc_{25\%} \in Exc | Exc_i \geq Exc_{25\%}) = 25\%$$

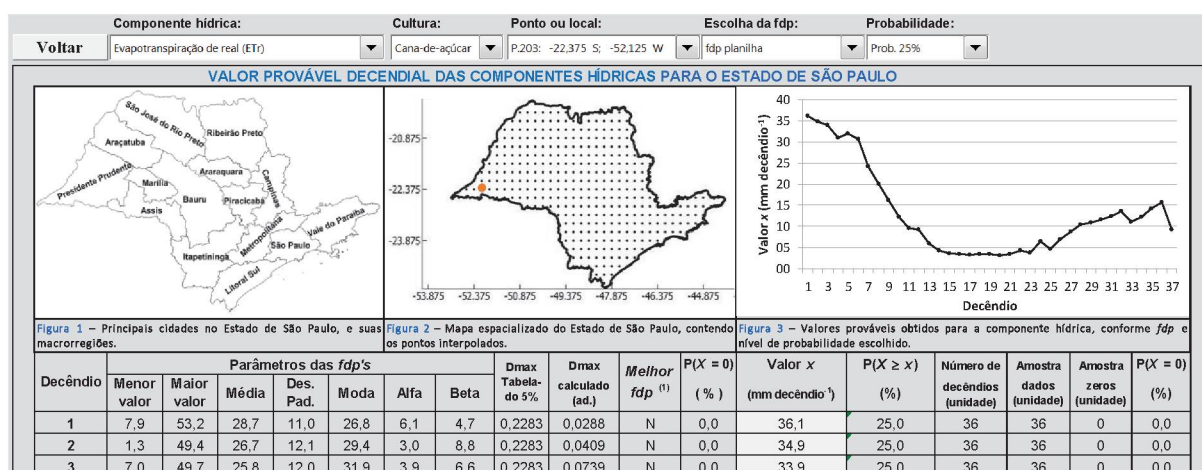
Com o auxílio do programa estatístico Rstudio® 4.0 foram gerados mapas de  $ETc$ ,  $Arm$ ,  $ETr$ ,  $Def$  e  $Exc$  prováveis para o Estado de São Paulo, com os valores decendiais prováveis calculados para cada ponto do *grid* regular  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ .

### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.5.1 Parâmetros das *fdp*'s de melhor ajuste e cálculo do valor provável dos dados de saída do *BHA*

Os parâmetros das funções densidade de probabilidade de melhor ajuste para *ETc*, *Arm*, *ETr*, *Def* e *Exc*, obtidos no presente trabalho (650016 parâmetros obtidos), foram organizados e dispostos em uma planilha eletrônica automática desenvolvida para permitir a sua saída/identificação (FIGURA 3.2; APÊNDICE 1), bem como realizar os cálculos dos valores prováveis das componentes hídricas estudadas para cada ponto do grid regular  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , no Estado de São Paulo.

FIGURA 3.2 – PLANILHA ELETRÔNICA PARA SAÍDA/IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE MELHOR AJUSTE PARA *ETc*, *Arm*, *ETr*, *Def* e *Exc*, E CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA, PARA CADA PONTO DO GRID REGULAR  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , NO ESTADO DE SÃO PAULO.



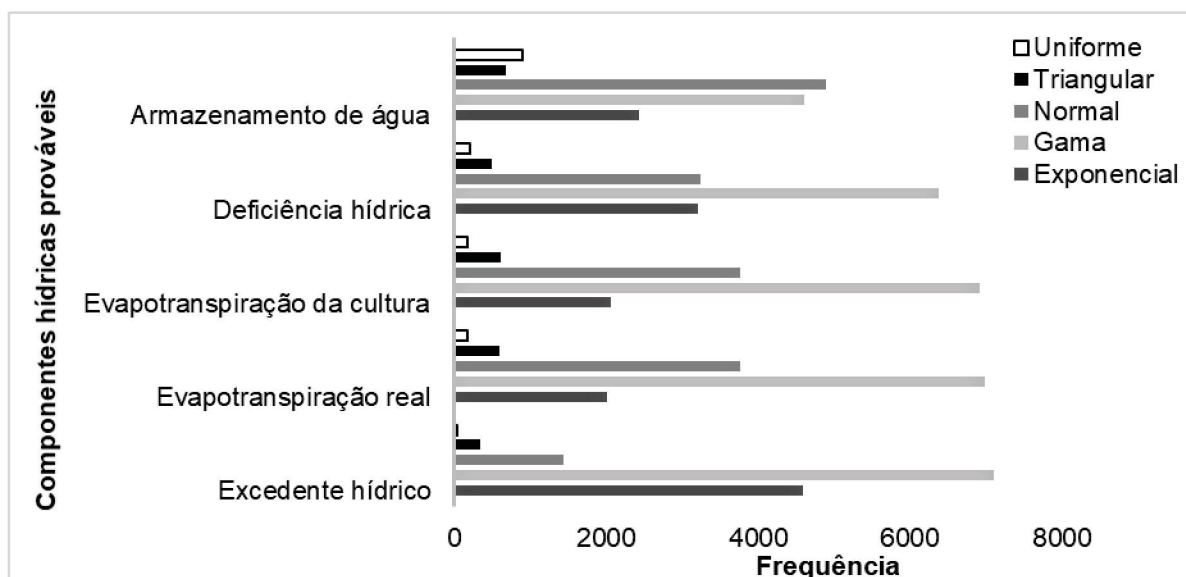
Fonte: A autora (2020)

### 3.5.2 Funções densidade de probabilidade

No APÊNDICE 3 (TABELAS A3.1 A A3.5) encontram-se as frequências das funções densidade de probabilidade (Exponencial; Gama; Normal; Triangular; e Uniforme) de melhor ajuste para as séries decendiais de *ETc*, *Arm*, *ETr*, *Def* e *Exc* no Estado de São Paulo. Na FIGURA 3.3 encontra-se um resumo das *fdp*'s de melhor ajuste com as séries das componentes hídricas (*ETc*, *Arm*, *ETr*, *Def* e *Exc*).

Do total de 67710 análises realizadas com os testes de aderência para as cinco componentes hídricas prováveis, 47% apresentou melhor ajuste à *fdp* Gama, 25% à *fdp* Normal, 21% à *fdp* Exponencial, 4% à *fdp* Triangular e, 2% apresentaram melhor ajuste para a *fdp* Uniforme (FIGURA 3.3; APÊNDICE 3).

FIGURA 3.3 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DAS *fdp*'s (EXPONENCIAL, GAMA, NORMAL, TRIANGULAR E UNIFORME) QUE MELHOR SE AJUSTARAM AOS VALORES DECENDIAIS DAS COMPONENTES HÍDRICAS DE SAÍDA DO AQUACROP PARA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR, PARA O PERÍODO DE 36 ANOS, NOS 37 DECÊNDIOS DO ANO, NO ESTADO DE SÃO PAULO.



FONTE: A autora (2020).

A *fdp* Gama apresentou melhor ajuste às séries decendiais de  $ET_c$ ,  $ET_r$ ,  $Def$  e  $Exc$  estudadas. Apesar do alto ajuste com a *fdp* Gama, deve-se considerar que 46% dos valores decendiais das componentes hídricas melhor se ajustaram às *fdp*'s normal e exponencial, justificando o uso de outras *fdp* além da Gama em estudos com componentes hídricas, como evidenciaram Souza et al. (2020). As *fdp*'s Uniforme e Triangular foram as que menos se ajustaram às componentes hídricas estudadas e assume-se que poderiam ser excluídas de novos estudos com componentes de saída de *BHA*, como destacado por Gurski (2018) para a distribuição Uniforme em estudo no Estado do Paraná.

A *fdp* Normal se ajustou ao maior número de valores decendiais de  $Arm_{75\%}$  (FIGURA 3.3), sendo 36% do total dos testes de aderência para essa componente hídrica. As *fdp*'s Exponencial, Gama, Triangular e Uniforme se ajustaram a 18%, 34%, 5% e 7% dos valores decendiais de  $Arm_{75\%}$ , respectivamente. O fato da *fdp* Normal melhor se ajustar aos valores de  $Arm$  é comum e confirmado por resultados encontrados em diferentes partes do Brasil (Arévalo-Hernández et al., 2017; Gurski, 2018; Coelho et al., 2019; Nascimento et al., 2019).

Verificou-se que as  $ET_c$ ,  $ET_r$  e  $Def$  foram semelhantes quanto ao ajuste às *fdp*'s. A *fdp* Gama obteve melhor ajuste em 51%, 52% e 47% dos testes com os valores decendiais prováveis de  $ET_c$ ,  $ET_r$  e  $Def$ , respectivamente. Exponencial,



Normal, Triangular e Uniforme apresentaram, respectivamente, melhor ajuste em 24%, 24%, 4% e 2% para  $Def$ , 15%, 28%, 5% e 1% para  $ET_c$  e 15%, 28%, 4% e 1% para  $ET_r$  (FIGURA 3.3).

Para os valores decendiais de  $Exc_{25\%}$ , a  $fdp$  que melhor se ajustou foi a Gama (53% do total; FIGURA 3.3), seguida da  $fdp$  Exponencial (34% do total), Normal (11% do total), Triangular (3% do total) e Uniforme (0% do total), que não apresentou nenhum ajuste nas análises.

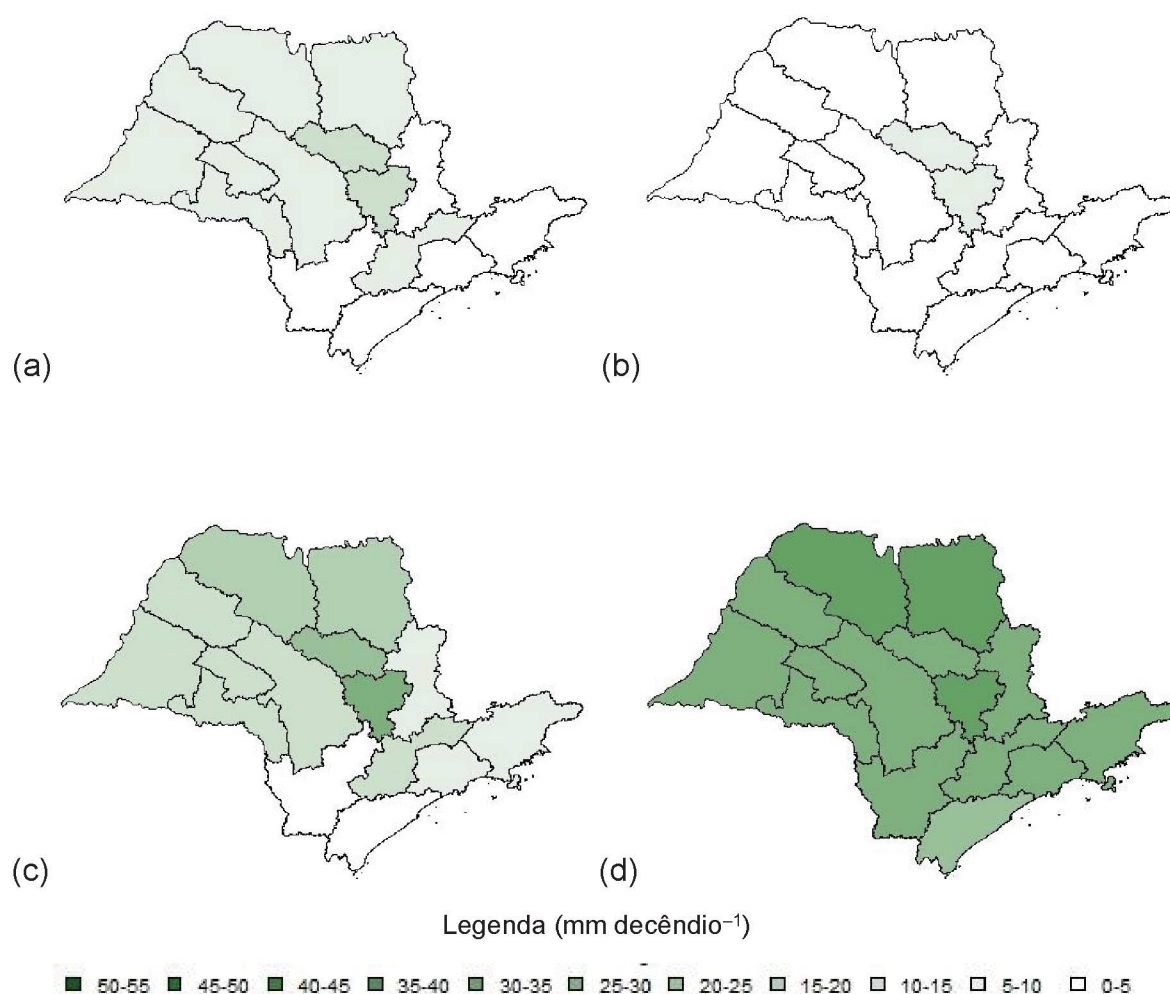
Geralmente, a distribuição Gama é que melhor se ajusta às componentes hídricas em estudos de disponibilidade de água na agricultura (Sattar et al., 2018; Pramudya et al., 2019; Vergni et al., 2020). No entanto, verificam-se resultados de bons ajustes com outras distribuições também, tais como Cauchy, Gumbel, Log-normal e Weibull, demonstrando que é válido testar novas possibilidades (Fernandes et al., 2019; Chandrasasi et al., 2020; Gronewold et al., 2020; Guevara-ochoa et al., 2020).

### 3.5.3 Valores prováveis dos dados de saída do BHA

Nas FIGURAS 3.4 a 3.8 encontram-se apresentados, respectivamente, os valores decendiais médios prováveis das componentes hídrica do BHA para a cultura da cana-de-açúcar, quais sejam: evapotranspiração da cultura, armazenamento da água no solo; evapotranspiração real; deficiência hídrica; e, excedente hídrico.

A  $ET_{c_{25\%}}$  para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo foi de até 10 mm decêndio<sup>-1</sup> no inverno, entre o 18º (20/06 a 29/06) e 26º (08/09 a 17/09) decêndio. Os maiores valores no inverno se concentraram nas regiões de Araraquara e Piracicaba (FIGURA 3.4). Os maiores valores de  $ET_{c_{25\%}}$  ocorreram no verão, entre o 37º (27/12 a 31/12) e 8º (12/03 a 21/03) decêndio, com valores esperados predominantemente entre 23 a 36 mm decêndio<sup>-1</sup>. São José do Rio Preto, Ribeirão Preto e Piracicaba se descaram quanto aos maiores valores esperados de  $ET_{c_{25\%}}$  no Estado (FIGURA 3.4).

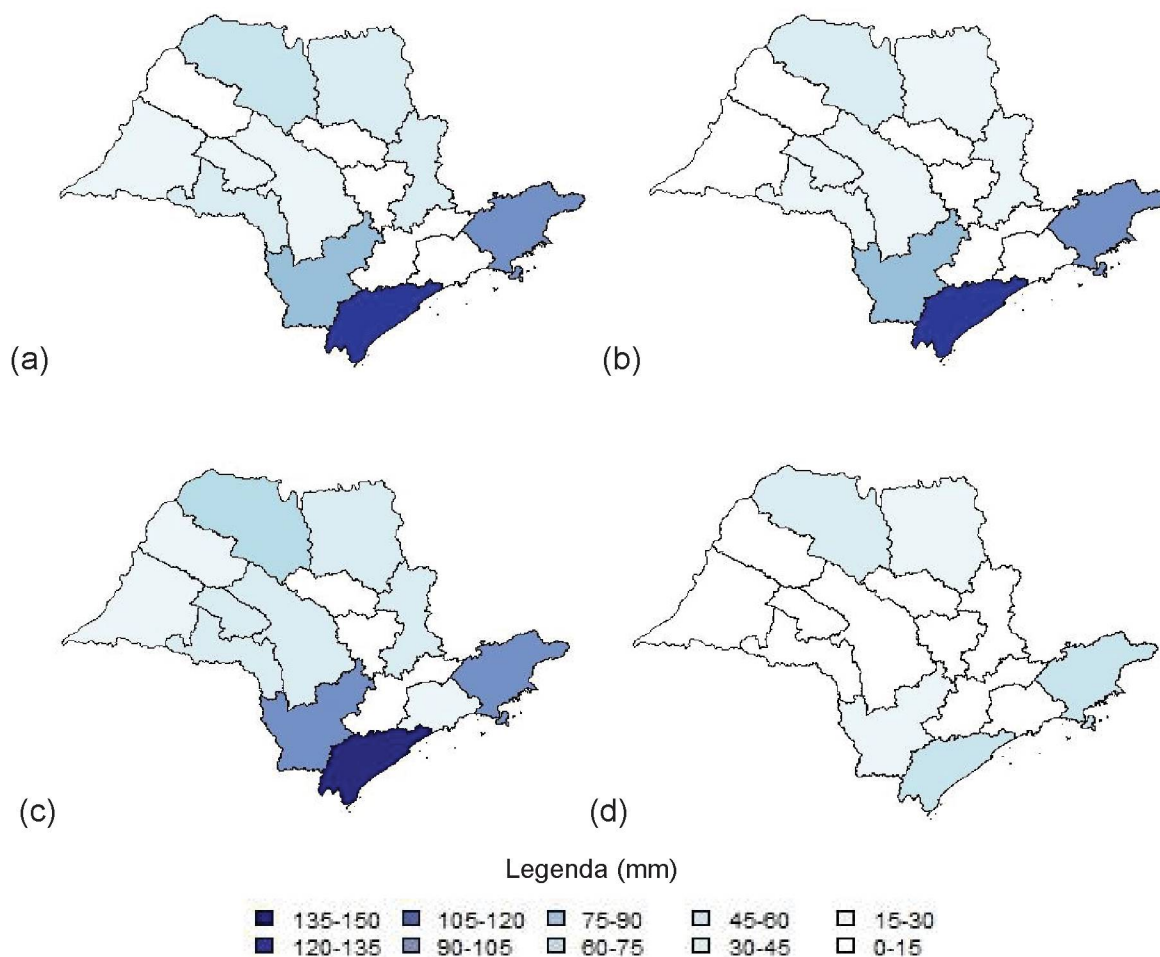
FIGURA 3.4 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DECENDIAL, MÉDIA PROVÁVEL A 25% ( $ET_{c_{25\%}}$ ; mm DECÊNDIO<sup>-1</sup>) NO ESTADO DE SÃO PAULO, PARA AS ESTAÇÕES: a) OUTONO; b) INVERNO; c) PRIMAVERA; E, d) VERÃO.



FONTE: A autora (2020).

Durante a estação do outono, entre o 9º (22/03 a 31/03) e 17º (10/06 a 19/06) decêndio, espera-se valores de  $Arm_{75\%}$  (FIGURA 3.5) de até 120 mm na região Litoral Sul, 100 mm na região de Itapetininga e Vale do Paraíba, 80 mm nas regiões de São José do Rio Preto, Ribeirão Preto, Assis e Campinas, e 50 mm no restante do Estado. No inverno, valores reduzem 10 mm, em média, em todas as regiões do Estado. Durante o verão espera-se valores de  $Arm_{75\%}$  de até 75 mm no Litoral Sul e Vale do Paraíba, 60 mm em São José do Rio Preto, 45 mm em Ribeirão Preto e Itapetininga e de até 15 mm no restante do Estado.

FIGURA 3.5 – ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO NA ZONA DA RAIZ, MÉDIO PROVÁVEL A 75% ( $ARM_{75\%}$ ; mm) NO ESTADO DE SÃO PAULO, PARA AS ESTAÇÕES: a) OUTONO; b) INVERNO; c) PRIMAVERA; E, d) VERÃO.



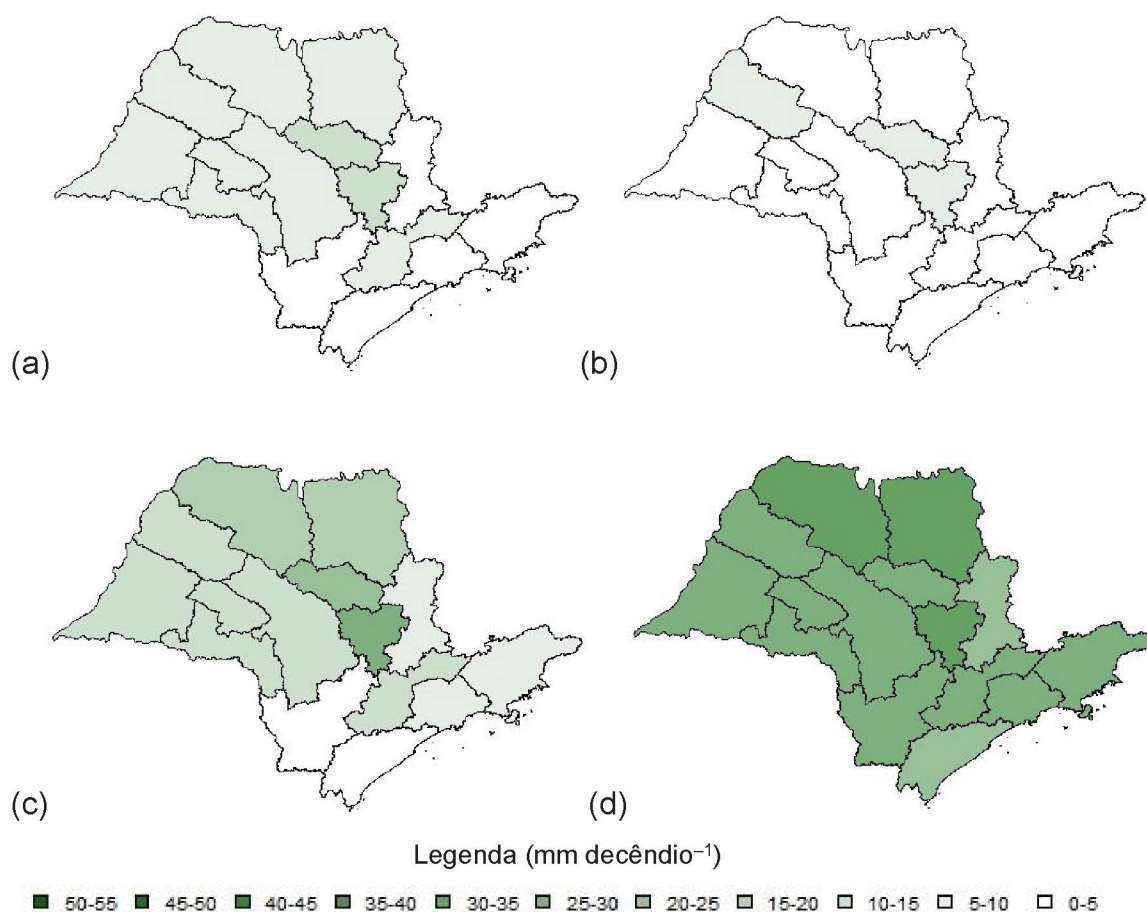
FONTE: A autora (2020).

A estação da primavera, entre o 27º (18/09 a 27/09) e 36º (17/12 a 26/12) decêndio, apresentou os maiores valores médios de  $Arm_{75\%}$  ao longo do ano. Espera-se valores de  $Arm_{75\%}$  de até 130 mm no Litoral Sul, 105 mm em Itapetininga e Vale do Paraíba, 90 mm em São José do Rio Preto e 75 mm no restante do Estado (FIGURA 3.5).

O inverno é a estação em que se espera menor  $ETr_{25\%}$  para a cultura da cana-de-açúcar no Estado (FIGURA 3.6), sendo de até 10 mm decêndio<sup>-1</sup> em Araçatuba, Piracicaba e Araraquara, e 5 mm decêndio<sup>-1</sup> no restante do Estado. No outono são esperados valores de  $ETr_{25\%}$  de até 5 mm decêndio<sup>-1</sup> no litoral do Estado, Itapetininga e Campinas, 15 mm decêndio<sup>-1</sup> em Piracicaba e Araraquara, e 10 mm decêndio<sup>-1</sup> nas demais regiões.

FIGURA 3.6 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DECENDIAL, MÉDIA PROVÁVEL A 25% ( $ETr_{25\%}$ ; mm decêndio<sup>-1</sup>) NO ESTADO DE SÃO PAULO, PARA AS ESTAÇÕES: a) OUTONO; b) INVERNO; c) PRIMAVERA; E, d) VERÃO.





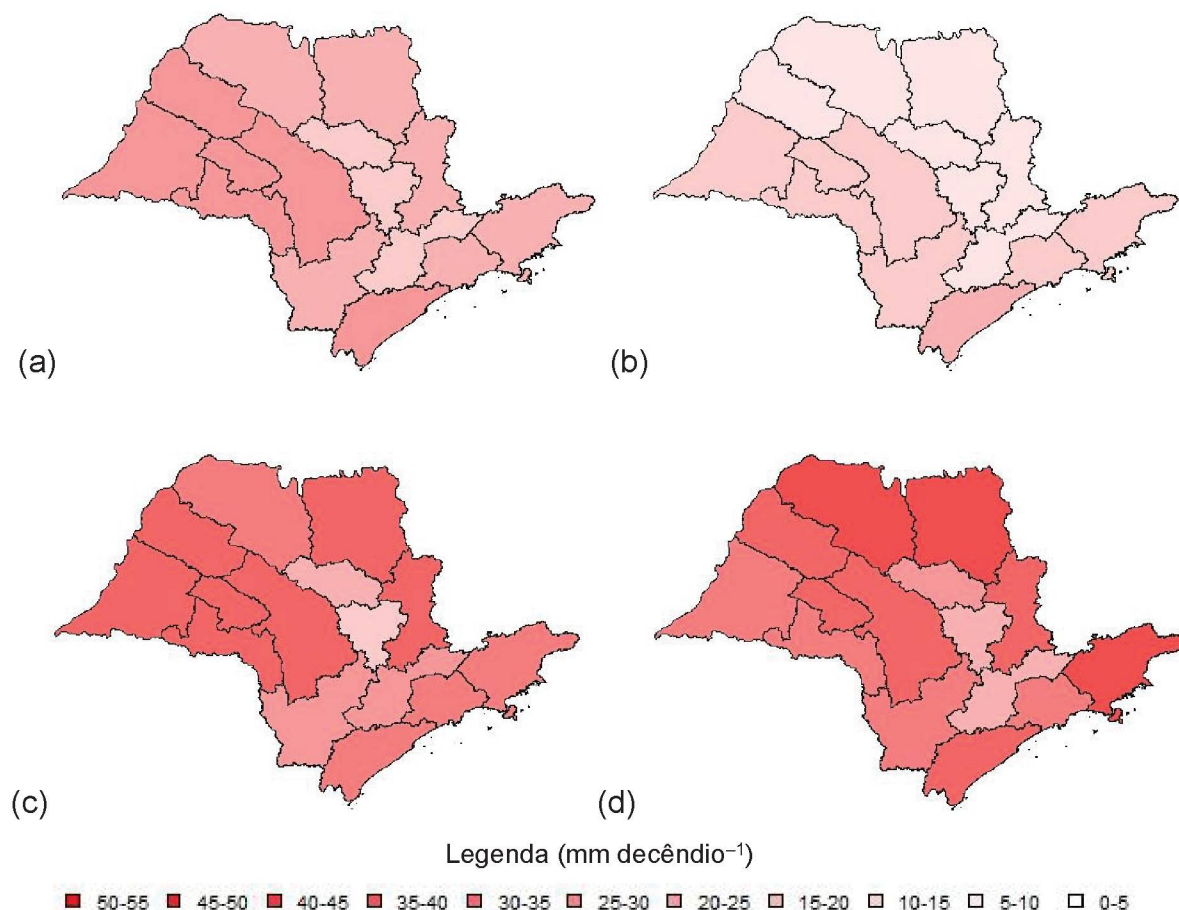
FONTE: A autora (2020).

Durante a primavera espera-se valores de  $ETr_{25\%}$  (FIGURA 3.6) inferiores aos seguintes limites de classe: 5 mm decêndio<sup>-1</sup> no Litoral Sul e Itapetininga, 10 mm decêndio<sup>-1</sup> em São Paulo, Campinas e Vale do Paraíba, 15 mm decêndio<sup>-1</sup> na região central e oeste do Estado, 20 mm decêndio<sup>-1</sup> em São José do Rio Preto e Ribeirão Preto, 25 mm decêndio<sup>-1</sup> em Araraquara, e 30 mm decêndio<sup>-1</sup> em Piracicaba.

Ao longo do verão são esperados os maiores valores de  $ETr_{25\%}$ , com até 35 mm decêndio<sup>-1</sup> nas regiões de Ribeirão Preto, São José do Rio Preto e Piracicaba, 23 mm decêndio<sup>-1</sup> no Litoral Sul e Campinas e 30 mm decêndio<sup>-1</sup> no restante das regiões (FIGURA 3.6).

O Estado de São Paulo apresentou valores de  $Def_{25\%}$  (FIGURA 3.7) superior no período primavera-verão, entre o 27º (18/09 a 27/09) e 8º (12/03 a 21/03) decêndio, variando entre 13 a 49 mm decêndio<sup>-1</sup>. Predominantemente são esperados até 40 mm decêndio<sup>-1</sup> na primavera e até 49 mm decêndio<sup>-1</sup> no verão, principalmente nas regiões em que há maior plantio de cana no Estado (Rudorff, 2010).

FIGURA 3.7 – DEFICIÊNCIA HÍDRICA DECENDIAL, MÉDIA PROVÁVEL A 25% ( $Def_{25\%}$ ; mm decêndio<sup>-1</sup>) NO ESTADO DE SÃO PAULO, PARA AS ESTAÇÕES: a) OUTONO; b) INVERNO; c) PRIMAVERA; E, d) VERÃO.



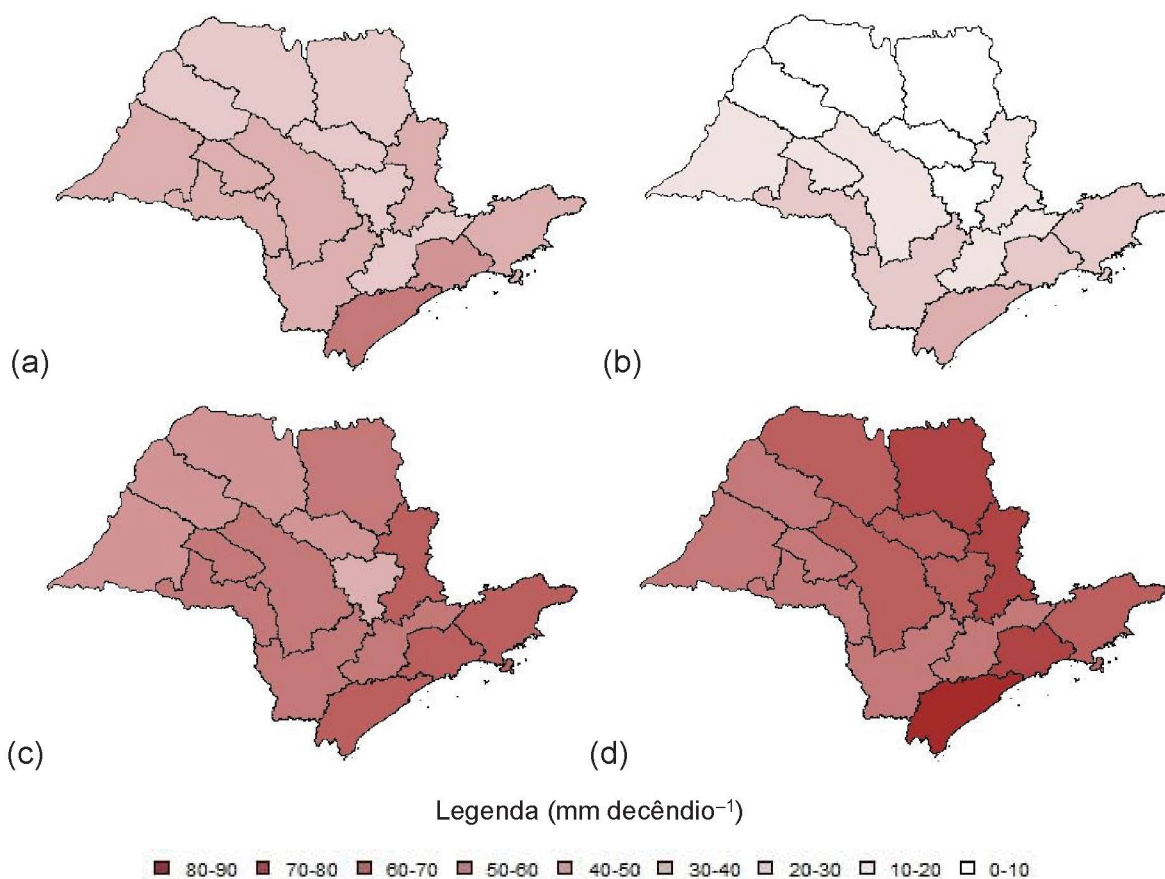
FONTE: A autora (2020).

No inverno espera-se menor  $Def_{25\%}$  nas regiões centrais e que fazem limite com Minas Gerais (FIGURA 3.7). Nas demais regiões, espera-se  $Def_{25\%}$  de até 20 mm decêndio<sup>-1</sup>. A exceção ocorreu para o Litoral Sul, em que se espera deficiência hídrica provável de até 23 mm decêndio<sup>-1</sup>. As regiões de Araraquara, Piracicaba e Metropolitana são as em que menos se espera deficiência hídrica para a cultura da cana-de-açúcar em todas as estações do ano (FIGURA 3.7).

O Estado de São Paulo apresentou valores de  $Exc_{25\%}$  (FIGURA 3.8) superior durante o verão, sendo esperados até 90 mm decêndio<sup>-1</sup> nas regiões de Ribeirão Preto, Campinas e Litoral Sul, 70 a 80 mm decêndio<sup>-1</sup> em São José do Rio Preto, Araraquara, Bauru e Piracicaba, 50 mm decêndio<sup>-1</sup> no restante do estado. O verão é

a única estação do ano em que se espera  $Exc_{25\%}$  maiores do que 70 mm decêndio<sup>-1</sup> de  $Exc_{25\%}$ .

FIGURA 3.8 – EXCEDENTE HÍDRICO DECENDIAL, MÉDIA PROVÁVEL A 25% ( $Exc_{25\%}$ ; mm DECÊNDIO<sup>-1</sup>) NO ESTADO DE SÃO PAULO, PARA AS ESTAÇÕES: a) OUTONO; b) INVERNO; c) PRIMAVERA; E, d) VERÃO.



FONTE: A autora (2020).

Espera-se durante o inverno pouco excedente hídrico em todo o Estado de São Paulo, com maior probabilidade de ausência de escoamento superficial ( $Exc_{25\%} = 0$ ) nas regiões de Araçatuba, Araraquara, São José do Rio Preto, Ribeirão Preto e Piracicaba (FIGURA 3.8). Em média, observou-se aumento de até 20 mm decêndio<sup>-1</sup> de  $Exc_{25\%}$  no outono, nas regiões mencionadas anteriormente. As regiões sudeste e litorânea se destacam, esperando-se até 50 mm decêndio<sup>-1</sup> do  $Exc_{25\%}$  durante a estação.

### 3.5.4 BHA para cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo



As simulações dos *BHA*'s calculados com o AquaCrop no presente estudo indicaram que a  $ET_{c25\%}$  da cana-de-açúcar provavelmente é inferior a 36 mm decêndio<sup>-1</sup> (FIGURA 3.4) na primavera e verão. Bem como, a  $Def_{25\%}$  provável deverá ser inferior a 48 mm decêndio<sup>-1</sup> (FIGURA 3.7) nas mesmas estações. Como a  $P_{75\%}$  calculada no Capítulo II (FIGURA 2.5) variou entre 14 e 52 mm decêndio<sup>-1</sup>, evidenciou-se, em média, que a cultura da cana-de-açúcar é pouco ou não prejudicada pela falta de água durante seu ciclo no Estado de São Paulo. Assim, em média, as precipitações pluviométricas são suficientes para as plantações que dependem exclusivamente da água da chuva como fonte de reposição hídrica, o que ocorre em aproximadamente 87% da área total cultivada de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo (ANA, 2017).

No entanto, o consumo de água pela cana-de-açúcar é variável. Estudos realizados no Noroeste Paulista indicam consumo hídrico entre 1095 e 1595 mm ciclo<sup>-1</sup> (Avilez et.al., 2018), com valor diário variando entre 2 e 7 mm dia<sup>-1</sup> (Rodrigues da Silva et al., 2014). Além disso, o consumo da cultura não depende somente da demanda evapotranspirativa, mas também da variedade cultivada e fases de desenvolvimento da cultura (Oliveira et al., 2018).

Ressalta-se que nos períodos em que a precipitação pluviométrica (calculada no Capítulo II) tem maior probabilidade de ser muito baixa ou ausente (outono-inverno; FIGURA 2.5) a planta está em desenvolvimento. Devido às demandas fisiológicas, a evapotranspiração da cultura (FIGURA 3.4) deverá ser superior à precipitação em todo o Estado, principalmente durante o outono e inverno. Logo, são importantes iniciativas visando conservar ou aumentar a capacidade de armazenamento de água no solo na zona da raiz, ou utilizar fontes hídricas complementares, como a irrigação.

Libardi et al. (2019) estudando o ciclo produtivo da cana-de-açúcar durante primavera e verão no município de Pradópolis, região de Ribeirão Preto no Estado de São Paulo, verificaram consumo hídrico médio de 4,7 mm dia<sup>-1</sup> no primeiro mês de cultivo, em novembro. No entanto, o valor consumido pode ser bem variável. Barbosa et al. (2017) também estudando o ciclo produtivo da cana-de-açúcar no município de Campinas verificaram consumo hídrico médio de 2,5 mm dia<sup>-1</sup> no mesmo mês de novembro. Assim, o cruzamento entre os resultados obtidos no presente estudo com o consumos hídricos estimados em Libardi et al. (2019) e Barbosa et al. (2017) indicou que a primavera é um período favorável para seu cultivo nas principais regiões do

Estado de São Paulo, exceto em Araraquara, Piracicaba e Região Metropolitana de São Paulo. A Primavera é a estação em que o desenvolvimento da cultura passa pelos estágios inicial e desenvolvimento vegetativo, totalizando consumo médio de 32 mm decêndio<sup>-1</sup> no período (Barbosa et al., 2017; Libardi et al., 2019), valor similar à  $ET_{c_{25\%}}$  encontrada no presente estudo (FIGURA 3.4).

Durante o verão e início do outono tem-se o desenvolvimento dos perfilhos, com o pico ocorrendo principalmente no verão (Dingre & Gorantiwar, 2020). Essa fase estimula demanda hídrica da cultura da cana-de-açúcar, podendo chegar a 44 mm decêndio<sup>-1</sup> em média (Barbosa et al., 2017; Libardi et al., 2019). Por esse motivo é o período em que são esperados os maiores valores de  $ET_{c_{25\%}}$  ao longo do ciclo da cultura (FIGURA 3.4).

Nas análises de *BHA* verificou-se  $Arm_{75\%}$  de até 15 mm no verão, na maioria das regiões do Estado de São Paulo, podendo chegar a 70 mm em São José do Rio Preto (FIGURA 3.5). As  $Def_{25\%}$  no verão variam entre 30 mm decêndio<sup>-1</sup> e 50 mm decêndio<sup>-1</sup> (FIGURA 3.7). Os resultados obtidos evidenciaram que a cana-de-açúcar pode ser prejudicada pela falta de água disponível durante o período crítico de perfilhamento. Essa limitação pode reduzir o acúmulo de matéria seca, altura, rendimento e, em casos extremos, atingir mortalidade (Endres et al., 2018; Khonghintaisong et al., 2020).

Para o período outono-inverno, quando ocorre o crescimento final e a maturação da cana-de-açúcar, o consumo hídrico médio é de 36 mm decêndio<sup>-1</sup> (Libardi et al., 2019). Assim, mesmo a  $ET_{c_{25\%}}$  sendo baixa no período, a contabilização do armazenamento da água ao longo das estações (FIGURA 3.4) indicam que haverá falta de água disponível para a planta no inverno, principalmente nas regiões de Araçatuba e Araraquara, que tem grande importância na produção nacional da cultura (IBGE, 2020). O  $Arm_{75\%}$  no inverno é muito baixo nessas regiões (FIGURA 3.5), sendo esperado  $Def_{25\%}$  de até 20 mm decêndio<sup>-1</sup> (FIGURA 3.7), demonstrando que a cultura sofrerá com a baixa disponibilidade hídrica no período.

O déficit hídrico em conjunto com a falta de técnicas e informações científicas corretas, que sejam focadas nas características edafoclimáticas de determinada região, são as principais causas de baixa produtividade de culturas agrícolas. Se a cultura da cana-de-açúcar sofrer déficit hídrico durante os ciclos haverá redução de

sua produtividade. A redução pode atingir até 50% do ciclo da cana-soca em relação à cana-planta (Casaroli et al., 2019).

Contudo, a cana-de-açúcar pode ser considerada tolerante à falta de água durante seu ciclo. Marcos et al. (2018) explicam que a tolerância pode ser aprimorada no decorrer dos ciclos da cultura, ao aderir informações de eventos passados e se adaptar ao estresse hídrico. O aumento do crescimento radicular e acúmulo de água nas raízes são exemplos dessa adaptação. Simões et al. (2018) também verificaram que plantas em estágio de crescimento vegetativo e maturação melhoraram a eficiência do uso da água com déficit de 15% da evapotranspiração da cultura.

Apesar da tolerância e adaptação à limitação ou falta de água, a quantidade de água disponível para a cana-de-açúcar afeta diretamente sua produção de biomassa total por unidade de área (Coelho et al., 2019). Nesse sentido, a inclusão de irrigação complementar tem mostrado benefícios, principalmente na fase de transição do perfilhamento até o fim do crescimento vegetativo (Teixeira et al., 2016). A irrigação é uma alternativa que visa estabilizar a produtividade da cultura e que deve ser realizada com um planejamento de uso racional e preservação de água (Oliveira et al., 2018).

Estudos de cenários climáticos futuros na produção de culturas possibilitam ao produtor reduzir e/ou evitar perdas na produção de produtividade, aumentando sua renda e assegurando a sustentabilidade do uso da terra (Liu et al., 2016; Oliveira et al., 2018; Adeboye et al., 2019).

### 3.6 CONCLUSÕES

As simulações do balanço hídrico agrícola calculado com o AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo e estudo dos valores prováveis decendiais indicaram que:

A *fdp* Gama apresentou o melhor ajuste (51%, em média) aos valores decendiais das componentes hídricas *ETc*, *Def*, *ETr* e *Exc*. A *fdp* Normal apresentou melhor ajuste (36%) aos valores decendiais de *Arm*<sub>75%</sub>. Devido ao pouco ajuste encontrado para componentes hídricas estudadas, as *fdp*'s Uniforme (2%) e Triangular (4%) podem ser desconsideradas em estudos futuros de componentes hídricas.



Espera-se valores de  $ET_{c_{25\%}}$  inferiores a 10 mm decêndio<sup>-1</sup> no inverno e de até 36 mm decêndio<sup>-1</sup> no verão. Espera-se  $Arm_{75\%}$  de até 70 mm no verão, e valores de até 120 mm nas demais estações. Espera-se valores superiores de  $Exc_{25\%}$  durante o verão, com maior probabilidade de sua ausência ( $Exc_{25\%} = 0$ ) durante inverno nas regiões de Araçatuba, Araraquara, São José do Rio Preto, Ribeirão Preto e Piracicaba.

A primavera é favorável para o cultivo da cana-de-açúcar nas principais regiões do Estado de São Paulo. No verão espera-se maior consumo hídrico pela cultura ao longo do ciclo, que pode ser prejudicada pela falta de água disponível. O  $Arm_{75\%}$  no inverno é muito baixo nas regiões de Araçatuba e Araraquara, indicando que a cultura sofrerá com a baixa disponibilidade hídrica no período.

### 3.7 REFERÊNCIAS

ADEBOYE, O.B.; SCHULTZ, B.; ADEKALU, K.O.; PRASAD, K.C. Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max* L. merr) in Ile-Ife, Nigeria. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 213, p.1130-1146, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.006>.

ALENCAR, L.P. Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar. 2014. 133 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, Rome, v. 56. 300p. FAO, 1998.

ÁLVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Levantamento da Cana-de-Açúcar Irrigada na Região Centro-Sul do Brasil**. Brasília: ANA, 2017.

ARÉVALO-HERNÁNDEZ, C.O.; PINTO, F.C.; SOUZA JÚNIOR, J.O.; PAIVA, A.Q.; BALIGAR, V.C. Variability and correlation of physical attributes of soils cultivated with cacao trees in two climate zones in Southern Bahia, Brazil. **Agroforestry Systems**, [s.l.], v. 93, n. 3, p. 793-802, 8 dez. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-017-0176-4>.

ASSIS, F.N.; ARRUDA, H.V.; PEREIRA, A.R. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**. Pelotas: Ed. da UFPel, 1996. 161 p.

AVILEZ, A.M.A.; HERNANDEZ, F.B.T.; BISPO, R.C.; GIOVANELLI, L.B. Necessidade hídrica da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista. **Irriga**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 171-188, 25 set. 2018. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2018v1n1p171-188>.

BARBOSA, E.A.A.; MATSURA, E.E.; SANTOS, L.N.S.; GONÇALVES, I.Z.; NAZÁRIO, A.Z.; FEITOSA, D.R.C. Water footprint of sugarcane irrigated with treated sewage and freshwater under subsurface drip irrigation, in Southeast Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 153, p. 448-456, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.167>.

BOUDHINA, N.; MASMOUDI, M.M.; ALAYA, I.; JACOB, F.; MECHLIA, N. B. Use of AquaCrop model for estimating crop evapotranspiration and biomass production in hilly topography. **Arabian Journal of Geosciences**, [s.l.], v. 12, n. 8, p. 1-7, abr. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-019-4434-9>.

BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica**. 6.ed. São Paulo: Saraiva, 2010. 540p.

CARDOZO, N.P.; BORDONAL, R.O.; LASCALA, N. Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 204, p.861-871, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004>.

CASAROLI, D.; ALVES JÚNIOR, J.; EVANGELISTA, A.W.P. Quantitative and qualitative analysis of sugarcane productivity in function of air temperature and water stress. **Comunicata Scientiae**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.202-212, 17 abr. 2019. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/cs.v10i1.2574>.

CEPAGRI – CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA. Clima dos municípios paulistas: a classificação climática de Köppen para o Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>> Acesso em: 11 ago. 2018.

CHANDRASASI, D.; LIMANTARA, L.M.; JUNI, R.W. Analysis using the F. J. Mock Method for calculation of water balance in the Upper Konto Sub-Watershed. Iop Conference Series: **Earth and Environmental Science**, [s.l.], v. 437, p. 1-12, 11 fev. 2020. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/437/1/012019>

COELHO, J.V. Componentes do ciclo hidrológico e balanço hídrico agrícola provável para a cultura da soja no Estado do Piauí. Curitiba, 2019. 91p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

COELHO, R.D.S.; BARBOSA, F.S.; LEAL, D.P.V.; SANTOS, L.C.; RIBEIRO, N.L.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; MARTIN, D.L. Effect of water stress on renewable energy from sugarcane biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 103, p.399-407, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.025>.



DINGRE, S.K.; GORANTIWAR, S.D. Determination of the water requirement and crop coefficient values of sugarcane by field water balance method in semiarid region. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 232, n. 1, 106042, fev. 2020.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Trad. de H.R. Gheyi, A.A. de Sousa, F.A.V. Damasceno, J.F. de Medeiros. 2. ed. Campina Grande: UFPB, 2000. 221p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 144p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 24).

ENDRES, L.; SANTOS, C.M.; SOUZA, G.V.; MENOSSI, M.; SANTOS, J.C.M. Morphological changes recorded in different phenophases of sugarcane plants subjected to water stress in tropical field conditions. **Australian Journal of Crop Science**, [s.l.], v. 12, n. 07, p.1041-1050, 20 jul. 2018. Southern Cross Publishing. <http://dx.doi.org/10.21475/ajcs.18.12.07.pne780>.

FERNANDES, R.D.M.; JOSÉ, J.V.; WOLFF, W.; COSTA, J.O.; FOLEGATTI, M.V. Probability Distribution Functions Applied in the Water Requirement Estimates in Irrigation Projects. **Revista Caatinga**, [s.l.], v. 32, n. 1, p. 189-199, mar. 2019. FapUNIFESP. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252019v32n119rc>.

FRIZZONE, J.A.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SOUZA, J.L.M.; ZOCOLER, J.L. **Planejamento de irrigação**: análise de decisão de investimento. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Teresina: Embrapa Meio Norte, 2005. 627p

GALE, J; HILLEL, D; KAUFMANN, M.R.; KOSLOWSKI, T.T.; LIVNE, A.; NAYLOR, A.W.; PARKER, J.; POLJAKOFF-MAYBER, A.; RAWITZ, E.; TODD, G.W.; VAADIA, Y.; VIETS JR, F.G. **Water Deficits and Plant Growth**: plant responses and control of water balance. 3. ed. New York: Academic Press, 1972. 372 p.

GRONEWOLD, A.D.; SMITH, J.P.; READ, L.K.; CROOKS, J.L. Reconciling the water balance of large lake systems. **Advances in Water Resources**, [s.l.], v. 137, p. 1-13, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103505>.

GUEVARA-OCHOA, C.; MEDINA-SIERRA, A.; VIVES, L. Spatio-temporal effect of climate change on water balance and interactions between groundwater and surface water in plains. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 722, p. 1-18, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137886>.

GURSKI, B.C. Componentes hídricas prováveis e zoneamento de risco agroclimático para o Estado do Paraná. Curitiba, 2018. 132p. Tese (Doutorado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

HELLAL, F.; MANSOUR, H.; ABDEL-HADY, M.; EL-SAYED, S.; ABDELLY, C. Assessment water productivity of barley varieties under water stress by AquaCrop model. **Agriculture and Food**, [s.l.], v. 4, n. 3, p. 501-517, jun. 2019.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. São Paulo, set 2020.



IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Agropecuária Municipal. São Paulo, 2018.

KHONGHINTAISONG, J.; SONGSRI, P.; JONGRUNGKLANG, N. Root characteristics of individual tillers and the relationships with above-ground growth and dry matter accumulation in sugarcane. **Pakistan Journal of Botany**, Karachi, v. 52, n. 1, p.101-109, 2020.

LIBARDI, L.G.P.; FARIA, R.T.; DALRI, A.B.; ROLIM, G.S.; PALARETTI, L.F.; COELHO, A.P.; MARTINS, I.P. Evapotranspiration and crop coefficient (Kc) of pre-sprouted sugarcane plantlets for greenhouse irrigation management. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 212, p. 306-316, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.003>.

LIU, J.; BASNAYAKE, J.; JACKSON, P.A.; CHEN, X.; ZHAO, J.; ZHAO, P.; YANG, L.; BAI, Y.; XIA, H.; ZAN, F. Growth and yield of sugarcane genotypes are strongly correlated across irrigated and rainfed environments. **Field Crops Research**, [s.l.], v. 196, p.418-425, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.022>.

LÓPEZ-URREA, R.; DOMÍNGUEZ, A.; PARDO, J.J.; MONTOYA, F.; GARCÍA-VILA, M.; MARTÍNEZ-ROMERO, A. Parameterization and comparison of the AquaCrop and MOPECO models for a high-yielding barley cultivar under different irrigation levels. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 230, p. 105931-105946, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105931>.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Parâmetros de risco climático**. Brasília: MAPA, 2018a.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Portaria nº 43, de 30 de abril de 2018. Brasília: MAPA, 2018b.

MARCOS, F.C.C.; SILVEIRA, N.M.; MOKOCHINSKI, J.B.; SAWAYA, A.C.H.F.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, E.C.; SOUZA, G.M.; LANDELL, M.G.A.; RIBEIRO, R.V. Drought tolerance of sugarcane is improved by previous exposure to water deficit. **Journal of Plant Physiology**, [s.l.], v. 223, p.9-18, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2018.02.001>.

MASASI, B.; TAGHVAEIAN, S.; GOWDA, P.H.; WARREN, J.; MAREK, G. Simulating soil water content, evapotranspiration and yield of variably irrigated grain Sorghum using AquaCrop. **Journal of the American Water Resources Association**, [s.l.], v. 55, n. 4. p.976–993, ago. 2019. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12757>

NASCIMENTO, F.A.L.; SILVA, A.J.P.; CAMPOS, A.R.F. Soil water storage variability in a three-dimensional analysis in the root zone of irrigated melon. **Bragantia**, [s.l.], v. 78, n. 4, p. 587-595, dez. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.20190067>.

OLIVEIRA, L.A.; MIRANDA, J.H.; COOKE, R.A.C. Water management for sugarcane and corn under future climate scenarios in Brazil. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 201, p.199-206, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.019>.

OTTONI, M.V. HYBRAS - hydrophysical database for Brazilian soils: banco de dados hidrofísicos em solos no Brasil para o desenvolvimento de funções de pedotransferências de propriedades hidráulicas: versão 1.0: relatório / Organizado por Marta Vasconcelos Ottoni. – Rio de Janeiro: CPRM, 2018. 27 p. 30 cm

PILATTI, M.A. Atributos físicos de um latossolo argiloso sob sistemas de manejo do solo. 2018. 59 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2018.

PRAMUDYA, Y.; ONISHI, T.; SENGE, M.; HIRAMATSU, K.; NUR, P.M.R. Evaluation of recent drought conditions by standardized precipitation index and potential evapotranspiration over Indonesia. **Paddy and Water Environment**, [s.l.], v. 17, n. 3, p. 331-338, 30 mar. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10333-019-00728-z>.

RAES, D. **The ETo Calculator**. Rome: FAO, 2012.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. **AquaCrop 6.0 – 6.1**: reference manual. Rome: FAO, 2018.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Soil, Plant and Atmosphere**: concepts, processes and applications. Switzerland: Springer International Publishing, 2020. 456 p.

RODRIGUES DA SILVA, V.P.; ROZANGELA BORGES, C.J.; GOMES DE ALBUQUERQUE, W. Necessidades hídricas da cana-de-açúcar cultivada em clima tropical. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 2, p. 625-632, 2014. ISSN: 1676-546X.

RUDORFF, B.F.T. et al. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using landsat data. **Remote Sensing**. 2010; 2(4):1057-1076. doi: <10.3390/rs2041057>.

SAAD, J.C.C.; SCALOPPI, E.J. Análise dos principais métodos climatológicos para estimativa da evapotranspiração. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, n. 8, 1988, Florianópolis, Anais... Florianópolis: ABID, v.2, p.1037–1052, 1988.

SALLAH, A.M.; TYCHON, B.; PICCARD, I.; GOBIN, A.; VAN HOOLST, R.; DJABY, B.; WELLENS, J.. Batch-processing of AquaCrop plug-in for rainfed maize using satellite derived Fractional Vegetation Cover data. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 217, p. 346-355, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.016>.

SARTORI, A. Desenvolvimento de critérios para avaliação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN. 2010. 237 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

SATTAR, A.; KHAN, S.A.; BANERJEE, S.; NANDA, M.K. Assessing sowing window and water availability of rainfed crops in eastern Indian state of Bihar for climate smart agricultural production. **Theoretical and Applied Climatology**, [s.l.], v. 137, n. 3-4, p. 2321-2334, 18 dez. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-018-2741-9>.



SILVESTRE, N.G.; VIEIRA, G.H.S.; ROSADO, T.L.; POLONI, C.M.M.; PETERLE, G.; KRAUSE, M.R. Produção de milho estimada pelo software AquaCrop e obtida pela cultura sob diferentes lâminas de irrigação. **Irriga**, [s.l.], v. 24, n. 3, p. 552-568, 27 set. 2019. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2019v24n3p552-568>.

SIMÕES, W.L.; CALGARO, M.; GUIMARÃES, M.J.M.; OLIVEIRA, A.R.; PINHEIRO, M.P.M.A. Sugarcane crops with controlled water deficit in the sub-middle São Francisco Valley, Brazil. **Revista Caatinga**, [s.l.], v. 31, n. 4, p.963-971, dez. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252018v31n419rc>.

SOUZA J.L.M, JERSZURKI D., DAMAZIO E.C. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 7, p.693-702, 2013.

SOUZA, J. L. M. Programa MORETTI – Módulo: Distribuição de frequência, teste de aderência e cálculo de valores prováveis, Versão 2.0, 2005(b). Curitiba: UFPR/SCA/DSEA. 2006.

SOUZA, J.L.M, JERSZURKI D.; BARROCA, M.V.; TRENTIN, C.V.; GURSKI, B.C. Precipitação e evapotranspiração de referência prováveis para o município de Pinhais-PR. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s.l.], v. 13, n. 4, p. 3512-3523, 25 mar. 2020. INOVAGRI. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v13n4001031>.

TEIXEIRA, A.H.C.; LEIVAS, J.F.; RONQUIM, C.C.; VICTORIA, D.C. Sugarcane Water Productivity Assessments in the São Paulo state, Brazil. **International Journal of Remote Sensing Applications**, [s.l.], v. 6, p. 84-95, 2016.

VERGNI, L.; TODISCO, F.; LENA, B.; MANNOCCHI, F. Bivariate analysis of drought duration and severity for irrigation planning. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 229, p. 105926-105937, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105926>.

VIEIRA, M.L.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 31, n. 6, p. 1271-1280, dez. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832007000600006>.

WALLER, P.; YITAYEW, M. **Irrigation and Drainage Engineering**. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. 747 p.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**. v.36, 2016.



#### 4 CONCLUSÕES GERAIS

A *fdp* Gama apresentou melhor ajuste aos valores decendiais de  $P$ ,  $ET_c$ ,  $ET_r$ ,  $Def$  e  $Exc$ , e a *fdp* Normal apresentou melhor ajuste aos valores decendiais de  $ET_o$  e  $Arm$ .

A  $P_{75\%}$  é bem definida no Estado de São Paulo, sendo superior no verão (20 a 53 mm decêndio<sup>-1</sup>) e primavera-verão (15 a 39 mm decêndio<sup>-1</sup>). A região litorânea (sul e sudeste) tem as maiores probabilidades de chuva ao longo do ano, com exceção do inverno. O inverno (0 a 15 mm decêndio<sup>-1</sup>) tem maior probabilidade de ausência de precipitação ( $P_0 = 0$ ).

A  $ET_{o25\%}$  é mais alta na primavera no Estado de São Paulo (38 a 52 mm decêndio<sup>-1</sup>), caindo no outono-inverno (25 a 40 mm decêndio<sup>-1</sup>). As maiores probabilidades de  $ET_{o25\%}$  encontra-se nas regiões norte e noroeste. Espera-se valores de  $ET_{c25\%}$  inferiores a 10 mm decêndio<sup>-1</sup> no inverno e de até 36 mm decêndio<sup>-1</sup> no verão.

Espera-se  $Arm_{75\%}$  de até 70 mm no verão, e valores de até 120 mm nas demais estações. Espera-se valores superiores de  $Exc_{25\%}$  durante o verão, com maior probabilidade de sua ausência ( $Exc = 0$ ) durante inverno nas regiões de Araçatuba, Araraquara, São José do Rio Preto, Ribeirão Preto e Piracicaba.

De modo geral, a primavera é um período favorável para o cultivo da cana-de-açúcar nas principais regiões do Estado de São Paulo. O verão é o período em que se espera maior consumo de água pela cultura ao longo do ciclo, que pode ser prejudicada pela falta de água disponível. O  $Arm_{75\%}$  no inverno é muito baixo nas regiões de Araçatuba e Araraquara, sendo que os resultados obtidos demonstram que a cultura sofrerá com a baixa disponibilidade hídrica no período.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento do balanço hídrico agrícola para a cana-de-açúcar no Estado de São Paulo permite que produtores e técnicos realizem o melhor planejamento do cultivo agrícola para a cana-de-açúcar. O ciclo hidrológico sofre constantes alterações, principalmente devido às mudanças climáticas, sendo as componentes hídricas importantes para diversos estudos a serem realizadas.

Os resultados encontrados no presente estudo podem ser utilizados por produtores, técnicos, engenheiros agrônomos e especialistas envolvidos com cultivos agrícolas e hidrologia, que desenvolvem o projeto de irrigação e drenagem, bem como o planejamento hídrico do cultivo da cultura da cana-de-açúcar por todo Estado de São Paulo.

O conhecimento dos valores prováveis para a agricultura possibilita a antecipação do manejo, a fim de minimizar riscos à cana-de-açúcar por déficit hídrico no Estado de São Paulo.

As condições hídricas do solo são cruciais para o bom desenvolvimento e alta produtividade da cana-de-açúcar. O módulo da Plataforma Moretti permitiu calcular facilmente os valores prováveis de  $P$ ,  $ET_o$  e demais componentes de saída do  $BHA$  ( $ET_c$ ,  $Arm$ ,  $ETr$ ,  $Def$  e  $Exc$ ), auxiliando no desenvolvimento do trabalho.

O cálculo do  $BHA$  considerando genótipos e variedades da cana-de-açúcar, e práticas de manejo como a presença e tipo de cobertura de solo, fertilização e salinidade do solo deve somar aos resultados deste estudo, sendo necessários estudos futuros para avaliar outros parâmetros, além dos tratados no presente estudo.

## 6 REFERÊNCIAS GERAIS

- ABDULLAH, S.S.; MALEK, M.A.; ABDULLAH, N.S.; KISI, O.; YAP, K.S. Extreme Learning Machines: A new approach for prediction of reference evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 527, p.184-195, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.073>.
- ABREU, E.X.; MATTOS, E.V.; SPERLING, V.B. Caracterização das Assinaturas de Radar e da Atividade Elétrica de Relâmpagos de Tempestades com Granizo no Estado de São Paulo. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 2, n. 43, p. 173-188, 2020.
- ADEBOYE, O.B.; SCHULTZ, B.; ADEKALU, K.O.; PRASAD, K.C. Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max* L. merr) in Ile-Ife, Nigeria. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 213, p.1130-1146, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.006>.
- ALENCAR, L.P. Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar. 2014. 133 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage Paper, Rome, v. 56. 300p. FAO, 1998.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, Rome, v. 56. 300p. FAO, 1998.
- ALMEIDA, T.S.; CALIJURI, M.L.; PINTO, L.B. Zoneamento agro-climático da cana-de-açúcar para o Estado de Minas Gerais com base em regressões múltiplas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.3, p. 352-355, 2013.
- ÁLVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES SOBRINHO, T.; RODRIGUES, D.B.B.; OLIVEIRA, P.T.S.; REBUCCI, L.C.S.; PERTUSSATTI, C.A. Estimativa da evapotranspiração de referência através de redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 197-203, 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-77862011000200004>.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Levantamento da Cana-de-Açúcar Irrigada na Região Centro-Sul do Brasil**. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2017.
- ARÉVALO-HERNÁNDEZ, C.O.; PINTO, F.C.; SOUZA JÚNIOR, J.O.; PAIVA, A.Q.; BALIGAR, V.C. Variability and correlation of physical attributes of soils cultivated with cacao trees in two climate zones in Southern Bahia, Brazil. **Agroforestry Systems**, [s.l.], v. 93, n. 3, p. 793-802, 8 dez. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-017-0176-4>.



ASCE-EWRI. **The ASCE standardized reference evapotranspiration equation**. Report of the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Reston: Institute of the American Society of Civil Engineers; 2005.

ASSIS, F.N.; ARRUDA, H.V.; PEREIRA, A.R. **Aplicações de estatística à climatologia**: teoria e prática. Pelotas: Ed. da UFPel, 1996.

AVILEZ, A.M.A.; HERNANDEZ, F.B.T.; BISPO, R.C.; GIOVANELLI, L.B. Necessidade hídrica da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 171-188, 2018. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2018v1n1p171-188>.

BANDA, M.B.; HEEREN, D.M.; MARTIN, D.L.; MUNOZ-ARRIOLA, F.; HAYDE, L.G. Economic Analysis of Deficit Irrigation in Sugarcane Farming. **American Society of Agriculture and Biological Engineers**, p.1-13, 2019. ASABE. <http://dx.doi.org/10.13031/aim.201900852>.

BANJARE, S.; RAWAT, S.; GAUTAM, S. Rainfall probability analysis for crop planning in Allahabad district of eastern Uttar Pradesh. Short Communication. **Journal of Agrometeorology**, v. 1 n. 21, p. 112-113, 2019.

BARBOSA, E.A.A.; MATSURA, E.E.; SANTOS, L.N.S.; GONÇALVES, I.Z.; NAZÁRIO, A.Z.; FEITOSA, D.R.C. Water footprint of sugarcane irrigated with treated sewage and freshwater under subsurface drip irrigation, in Southeast Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 153, p. 448-456, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.167>.

BECK, H.E.; VAN DIJK, A.I.J.M.; LEVIZZANI, V.; SCHELLEKENS, J.; MIRALLES, D.G.; MARTENS, B.; ROO, A. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 1, p. 589-615, 2017. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>.

BORGES, G.M.R.; THEBALDI, M.S. Estimativa da precipitação máxima diária anual e equação de chuvas intensas para o município de Formiga, MG, Brasil. **Ambiente e Agua** v. 11, n. 4, p.891-902, 2016. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrograficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1823>.

BOUDHINA, N.; MASMOUDI, M.M; ALAYA, I.; JACOB, F.; MECHLIA, N. B. Use of AquaCrop model for estimating crop evapotranspiration and biomass production in hilly topography. **Arabian Journal of Geosciences**, [s.l.], v. 12, n. 8, p. 1-7, abr. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-019-4434-9>.

BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica**. 6.ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica**. 6.ed. São Paulo: Saraiva, 2010. 540p.

CAMARGO, F.P.; FREDO, C.E.; GHOBIL, C.N.; BUENO, C.R.F.; BAPTISTELLA, C.S.L.; CASER, D.V.; ANGELO, J.A.; OLIVETTE, M.P.A.; COELHO, P.J.; MARTINS, V.A. Previsões e Estimativas das Safras Agrícolas do Estado de São Paulo, 2º Levantamento, Ano Agrícola 2018/19 e Levantamento Final, Ano Agrícola 2017/18, Novembro de 2018. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, v. 14, n. 2, p.1-13, 2019.

CARDOZO, N.P.; BORDONAL, R.O.; LASCALA, N. Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 204, p.861-871, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004>.

CASAROLI, D.; ALVES JÚNIOR, J.; EVANGELISTA, A.W.P. Quantitative and qualitative analysis of sugarcane productivity in function of air temperature and water stress. **Comunicata Scientiae**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.202-212, 17 abr. 2019. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/cs.v10i1.2574>.

CEPAGRI – CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA. Clima dos municípios paulistas: a classificação climática de Köppen para o Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>> Acesso em: 11 ago. 2018.

CHANDRASASI, D.; LIMANTARA, L.M.; JUNI, R.W. Analysis using the F. J. Mock Method for calculation of water balance in the Upper Konto Sub-Watershed. Iop Conference Series: **Earth and Environmental Science**, [s.l.], v. 437, p. 1-12, 11 fev. 2020. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/437/1/012019>

COELHO, J.V. Componentes do ciclo hidrológico e balanço hídrico agrícola provável para a cultura da soja no Estado do Piauí. Curitiba, 2019. 91p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

COELHO, R.D.S.; BARBOSA, F.S.; LEAL, D.P.V.; SANTOS, L.C.; RIBEIRO, N.L.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; MARTIN, D.L. Effect of water stress on renewable energy from sugarcane biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 103, p.399-407, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.025>.

CONDE, E.C.; BRITO, R.R.; MONTENEGRO, R.J.V.; ROMÁN, R.M.S. Comportamento temporal da evapotranspiração de referência em municípios de São Paulo e Províncias de Cuba. **Irriga**, v. 21, n. 2, p. 365-383, 2016. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2016v21n2p365-383>.

DINGRE, S.K.; GORANTIWAR, S.D. Determination of the water requirement and crop coefficient values of sugarcane by field water balance method in semiarid region. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 232, n. 1, 106042, fev. 2020.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Trad. de H.R. Gheyi, A.A. de Sousa, F.A.V. Damasceno, J.F. de Medeiros. 2. ed. Campina Grande: UFPB, 2000. 221p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).



DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 144p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 24).

ENDRES, L.; SANTOS, C.M.; SOUZA, G.V.; MENOSSE, M.; SANTOS, J.C.M. Morphological changes recorded in different phenophases of sugarcane plants subjected to water stress in tropical field conditions. **Australian Journal of Crop Science**, [s.l.], v. 12, n. 07, p.1041-1050, 20 jul. 2018. Southern Cross Publishing. <http://dx.doi.org/10.21475/ajcs.18.12.07.pne780>.

FERNANDES, R.D.M.; JOSÉ, J.V.; WOLFF, W.; COSTA, J.O.; FOLEGATTI, M.V. Probability Distribution Functions Applied in the Water Requirement Estimates in Irrigation Projects. **Revista Caatinga**, [s.l.], v. 32, n. 1, p. 189-199, mar. 2019. FapUNIFESP. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252019v32n119rc>.

FONTÃO, P.A.B.; ZAVATTINI, J.A.; SHERIDAN, S.C.; ARMOND, N.B. Gênese das chuvas em São Paulo (SP): estudo comparativo entre a "Spatial Synoptic Classification" e a "Análise Rítmica em Climatologia". **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, p. 267-288, 2018. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v23i0.58657>.

FREITAS, S.F. Atividade elétrica e precipitação de monção no Estado de São Paulo no período 2008-2011. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

FRIZZONE, J.A.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SOUZA, J.L.M.; ZOCOLER, J.L. **Planejamento de irrigação**: análise de decisão de investimento. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Teresina: Embrapa Meio Norte, 2005. 627p

GALE, J.; HILLEL, D.; KAUFMANN, M.R.; KOSLOWSKI, T.T.; LIVNE, A.; NAYLOR, A.W.; PARKER, J.; POLJAKOFF-MAYBER, A.; RAWITZ, E.; TODD, G.W.; VAADIA, Y.; VIETS JR, F.G. **Water Deficits and Plant Growth**: plant responses and control of water balance. 3. ed. New York: Academic Press, 1972. 372 p.

GARCIA, J.R.; MIYAMOTO, B.C.B.; MAIA, A.G. Eventos extremos de precipitação: identificação e análise da bacia hidrográfica do Rio Jundiá, São Paulo. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, n. 37, 2018.

GARCIA-VILA, M.; MORILLO-VELARDE, R.; FERERES, E. Modeling sugar beet responses to irrigation with AquaCrop for optimizing water allocation. **Water**, v. 11, n. 9, p. 1918-1936, 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11091918>.

GAYDON, D.S. **The APSIM model**: an overview. Austrália: Csiro, 2014.

GOFFA, F.; MAMARA, A.; ANADRANISTAKIS, M.; FLOCAS, H. Developing gridded climate data sets of precipitation for Greece based on homogenized time series. **Climate**, v. 5, n. 7, p. 68-89, 2019.

GRONEWOLD, A.D.; SMITH, J.P.; READ, L.K.; CROOKS, J.L. Reconciling the water balance of large lake systems. **Advances in Water Resources**, [s.l.], v. 137, p. 1-13, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103505>.



GUEVARA-OCHOA, C.; MEDINA-SIERRA, A.; VIVES, L. Spatio-temporal effect of climate change on water balance and interactions between groundwater and surface water in plains. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 722, p. 1-18, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137886>.

GURSKI, B.C. Componentes hídricas prováveis e zoneamento de risco agroclimático para o Estado do Paraná. Curitiba, 2018. 132p. Tese (Doutorado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

HELLAL, F.; MANSOUR, H.; ABDEL-HADY, M.; EL-SAYED, S.; ABDELLY, C. Assessment water productivity of barley varieties under water stress by AquaCrop model. **Agriculture and Food**, [s.l.], v. 4, n. 3, p. 501-517, jun. 2019.

HU, Z.; ZHOU, Q.; CHEN, X.; LI, J.; LI, Q.; CHEN, D.; LIU, W.; YIN, G. Evaluation of three global gridded precipitation data sets in central Asia based on rain gauge observations. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 9, p. 3475-3493, 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.5510>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. São Paulo, set 2020.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Agropecuária Municipal. São Paulo, 2018.

IBGE. **A geografia da cana-de-açúcar**: dinâmica territorial da produção agropecuária. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

IEA - INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. Banco de dados. São Paulo: IEA, 2017. Disponível em: <[http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod\\_sis=1&idioma=1](http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod_sis=1&idioma=1)> Acesso em: 10 set 2018.

JENSEN, M.E. **Design and operation of farm irrigation systems**. New York: American Society of Agricultural Engineers, 1974.

JERSZURKI, D. Caracterização das relações hídricas para a cultura do *Pinus taeda* no município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. Curitiba, 2013. 90p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J.L.M.; EVANGELISTA, A.W.P. Distribuição de probabilidade e movimento temporal da precipitação na região de Telêmaco Borba, Paraná. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 1, p. 110-116, 2015a.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J.L.M.; EVANGELISTA, A.W.P. Probabilidade e variação temporal da evapotranspiração de referência na região de Telêmaco Borba – PR. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 33, n. 2, p. 118-129, 2015b.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J.L.M.; SILVA, L.C.R. Sensitivity of ASCE-Penman–Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. **Climate Dynamics**, p.1-14, 2019. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-019-04619-1>

JONES, C.A.; WEGENER, M.K.; RUSSEL, J.S. **AUSCANE**: simulation of Australian sugarcane with EPIC. Brisbane: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1988.

JONES, M.; SINGELS, A. DSSAT v4.5 - **Canegro Sugarcane Plant Module**: user documentation. Mount Edgecombe: ICSM, 2008.

KHANMOHAMMADI, N.; REZAIE, H.; MONTASERI, M.; BEHMANESH, J. Regional probability distribution of the annual reference evapotranspiration and its effective parameters in Iran. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 134, n. 1-2, p.411-422, 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-017-2283-6>.

KHONGHINTAISONG, J.; SONGSRI, P.; JONGRUNGKLANG, N. Root characteristics of individual tillers and the relationships with above-ground growth and dry matter accumulation in sugarcane. **Pakistan Journal of Botany**, Karachi, v. 52, n. 1, p.101-109, 2020.

KIM, H. II; HAN, K. Y. Inundation Map Prediction with Rainfall Return Period and Machine Learning. **Water**, v. 12, n. 6, p. 1552-1568, 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12061552>.

KIM, Y.; KIM, H.; LEE, G.; MIN, K. A Modified Hybrid Gamma and Generalized Pareto Distribution for Precipitation Data. **Asia-pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 55, n. 4, p. 609-616, 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13143-019-00114-z>.

KUNKEL, K.E.; KARL, T.R.; EASTERLING, D.R.; REDMOND, K.; YOUNG, J.; YIN, X.; HENNON, P. Probable maximum precipitation and climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 7, p.1402-1408, 12 abr. 2013. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50334>.

LIBARDI, L.G.P.; FARIA, R.T.; DALRI, A.B.; ROLIM, G.S.; PALARETTI, L.F.; COELHO, A.P.; MARTINS, I.P. Evapotranspiration and crop coefficient (Kc) of pre-sprouted sugarcane plantlets for greenhouse irrigation management. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 212, p. 306-316, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.003>.

LIU, J.; BASNAYAKE, J.; JACKSON, P.A.; CHEN, X.; ZHAO, J.; ZHAO, P.; YANG, L.; BAI, Y.; XIA, H.; ZAN, F. Growth and yield of sugarcane genotypes are strongly correlated across irrigated and rainfed environments. **Field Crops Research**, [s.l.], v. 196, p.418-425, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.022>.

LOPES SOBRINHO, O.P.; SILVA, G.S.; PEREIRA, A.I.S.; SOUSA, A.B.; CASTRO JÚNIOR, W.L.; SANTOS, L.N.S. A cultura da Cana-De-Açúcar (*Saccharum officinarum*) e o manejo da irrigação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 4, p. 1605-1625, 2019. Centro Universitario de Maringa. <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n4p1605-1625>.

LOPES, A.R.; GIAROLA, C.M.; DOTTO, M.; CARVALHO, A.F.G.; FREDDO, A.R.; XAVIER, E. Utilização de diferentes distribuições de probabilidade para precipitações máximas no município de Francisco Beltrão/PR. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 7, p. 3090 – 3095, 2018.



LÓPEZ-URREA, R.; DOMÍNGUEZ, A.; PARDO, J.J.; MONTOYA, F.; GARCÍA-VILA, M.; MARTÍNEZ-ROMERO, A. Parameterization and comparison of the AquaCrop and MOPECO models for a high-yielding barley cultivar under different irrigation levels. **Agricultural Water Management**, v. 230, p. 105931-105946, 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105931>.

MADDAUS, M.L.; MADDAUS, W.O.; MADDAUS, L.A. **Water conservation programs: a planning manual**. 2. ed. Denver: American Water Works Association, 2017.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Parâmetros de risco climático**. Brasília: MAPA, 2018a.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Portaria nº 43, de 30 de abril de 2018. Brasília: MAPA, 2018b.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Relação de instituições cadastradas no departamento de cana-de-açúcar e agroenergia**. Brasília: MAPA, 2018c.

MARCOS, F.C.C.; SILVEIRA, N.M.; MOKOCHINSKI, J.B.; SAWAYA, A.C.H.F.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, E.C.; SOUZA, G.M.; LANDELL, M.G.A.; RIBEIRO, R.V. Drought tolerance of sugarcane is improved by previous exposure to water deficit. **Journal of Plant Physiology**, [s.l.], v. 223, p.9-18, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2018.02.001>.

MARCUZZO, F.F.N. Distribuição espacial da precipitação pluviométrica trimestral na bacia do Ribeirão Bonito, Lajeado em Penápolis e Glicério no Estado de São Paulo. In: XVIII SBSR, 2017.

MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; NASSIF, D.S.P.; VIANNA, M.S.; PILAU, F.G.; SILVA, E.H.F.M.; SOBENKO, L.R.; GONÇALVES, A.O.; PEREIRA, R.A.A.; CARVALHO, K.S. Revisiting the crop coefficient–reference evapotranspiration procedure for improving irrigation management. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 138, n. 3-4, p. 1785-1793, 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-019-02940-7>.

MASASI, B.; TAGHVAEIAN, S.; GOWDA, P.H.; WARREN, J.; MAREK, G. Simulating soil water content, evapotranspiration and yield of variably irrigated grain Sorghum using AquaCrop. **Journal of the American Water Resources Association**, [s.l.], v.55, n.4. p.976-993, ago. 2019. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12757>

MATTOS, E.V.; BARBOSA, S.; PEREIRA NETO, A.V.; RUSSO, L.; ALTAMIRANO, R.A.; FENANDEZ, J.P.R. **Avaliação das simulações numéricas de um tornado no setor central do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial. 2008.

MEJIAS, P.; PIRAUX, M. **AquaCrop: the crop water productivity model**. FAO, 2017.



MELLO, Y.; KOHLS, W.; OLIVEIRA, T.M.N. análise da precipitação mensal provável para o município de Joinville (SC) e região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 246-258, 2015. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v17i0.42975>.

NASCIMENTO, F.A.L.; SILVA, A.J.P.; CAMPOS, A.R.F. Soil water storage variability in a three-dimensional analysis in the root zone of irrigated melon. **Bragantia**, [s.l.], v. 78, n. 4, p. 587-595, dez. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.20190067>.

NOVA, N.A.V.; MIRANDA, J.H.; PEREIRA, A.B.; SILVA, K.O. Estimation of the potential evapotranspiration by a simplified penman method. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 3, p. 713-721, 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162006000300007>

OLIVEIRA, L.A.; MIRANDA, J.H.; COOKE, R.A.C. Water management for sugarcane and corn under future climate scenarios in Brazil. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 201, p.199-206, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.019>.

OLIVEIRA, L.M. **Distribuições Estatísticas**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1970.

OTTONI, M.V. HYBRAS - hydrophysical database for Brazilian soils: banco de dados hidrofísicos em solos no Brasil para o desenvolvimento de funções de pedotransferências de propriedades hidráulicas: versão 1.0: relatório / Organizado por Marta Vasconcelos Ottoni. – Rio de Janeiro: CPRM, 2018. 27 p. 30 cm

PARK, J.; SUNG, J.H.; LIM, Y.; KANG, H. Introduction and application of non-stationary standardized precipitation index considering probability distribution function and return period. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 136, n. 1-2, p. 529-542, 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-018-2500-y>.

PASSOS, M.L.V.; RAPOSO, A.B.; MENDES, T.J. Estimativa da distribuição da precipitação pluviométrica provável em diferentes níveis de probabilidade de ocorrência. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 1, p. 1106-1115, 2017.

PILATTI, M.A. Atributos físicos de um latossolo argiloso sob sistemas de manejo do solo. 2018. 59 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2018.

PITICAR, A.; MIHĂILĂ, D.; LAZURCA, L.G.; BISTRICEAN, P.; PUȚUNTICĂ, A.; BRICIU, A. Spatiotemporal distribution of reference evapotranspiration in the Republic of Moldova. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 124, n. 3-4, p.1133-1144, 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-015-1490-2>.

PRAMUDYA, Y.; ONISHI, T.; SENGE, M.; HIRAMATSU, K.; NUR, P.M.R. Evaluation of recent drought conditions by standardized precipitation index and potential evapotranspiration over Indonesia. **Paddy and Water Environment**, [s.l.], v. 17, n. 3, p. 331-338, 30 mar. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10333-019-00728-z>.

RAES, D. **The ETo Calculator**. Rome: FAO, 2012.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. **AquaCrop 6.0 – 6.1**: reference manual. Rome: FAO, 2018.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Soil, Plant and Atmosphere**: concepts, processes and applications. Switzerland: Springer International Publishing, 2020. 456 p.

RIBEIRO, N.V.; FERREIRA, L.G.; FERREIRA, N.C. Avaliação da expansão do cultivo da cana-de-açúcar no bioma cerrado por meio de modelagem dinâmica da paisagem. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 1, p. 1-14, 2016.

RODRIGUES DA SILVA, V.P.; ROZANGELA BORGES, C.J.; GOMES DE ALBUQUERQUE, W. Necessidades hídricas da cana-de-açúcar cultivada em clima tropical. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 2, p. 625-632, 2014. ISSN: 1676-546X.

ROSA, S.L.K. Análise de sensibilidade, calibração e validação da produtividade do trigo com o modelo AquaCrop na região dos Campos Gerais. Curitiba, 2018. 147p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

RUDORFF, B.F.T. et al. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using landsat data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010. doi: <10.3390/rs2041057>.

SAAD, J.C.C.; SCALOPPI, E.J. Análise dos principais métodos climatológicos para estimativa da evapotranspiração. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, n. 8, 1988, Florianópolis, Anais... Florianópolis: ABID, v.2, p.1037–1052, 1988.

SABINO, M.; SOUZA, A.P.; ULIANA, E.M.; LISBOA, L.; ALMEIDA, F.T.; ZOLIN, C.A. Intensity-duration-frequency of maximum rainfall in Mato Grosso State. **Ambiente e Água**, v. 15, n. 1, p. 1-12, 2020. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrograficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2373>.

SALLAH, A.M.; TYCHON, B.; PICCARD, I.; GOBIN, A.; VAN HOOLST, R.; DJABY, B.; WELLENS, J.. Batch-processing of AquaCrop plug-in for rainfed maize using satellite derived Fractional Vegetation Cover data. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 217, p. 346-355, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.016>.



SAMPAIO, S.C.; LONGO, A.J.; QUEIROZ, M.M.F.; GOMES, B.N.; BOAS, M.A.V.; SUSZEK, M. Estimativa e distribuição da precipitação mensal provável estimativa no Estado do Paraná. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences*, v. 28, n. 2, p.267-272, 2006. Universidade Estadual de Maringá. <http://dx.doi.org/10.4025/actascihumansoc.v28i2.169>.

SANTIAGO, E.J.P.; OLIVEIRA, G.M.; LEITÃO, M.M.V.B.R.; MOURA, M.S.B.; GONÇALVES, I.S. Precipitação esperada, em diferentes níveis de probabilidade, na região de Juazeiro, BA. *Journal of Environmental Analysis And Progress*, v. 2, n. 4, p.457-464, 2017. *Journal of Environmental Analysis and Progress - JEAP*. <http://dx.doi.org/10.24221/jeap.2.4.2017.1462.457-464>.

SANTOS, D.F. et al. Impacts of climate projections on water balance and implications on olive crop in Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 21, n. 2, p. 77-82, 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p77-82>.

SANTOS, R.S.; VIEIRA, P.D.; EVANGELISTA, D.H.R.; OLIVEIRA, L.J.C.; NONATO, D. Caracterização de Extremos Mensais de Precipitação em Cacoal (RO). *Revista Brasileira de Climatologia*, Curitiba, v. 22, n. 14, p.267-280, 2018.

SARTORI, A. Desenvolvimento de critérios para avaliação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN. 2010. 237 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

SATTAR, A.; KHAN, S.A.; BANERJEE, S.; NANDA, M.K. Assessing sowing window and water availability of rainfed crops in eastern Indian state of Bihar for climate smart agricultural production. *Theoretical and Applied Climatology*, [s.l.], v. 137, n. 3-4, p. 2321-2334, 18 dez. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-018-2741-9>.

SILVA, E.G.F.A.; POLYCARPO, J.S.M.; MÉLO, R.F.; MOUSINHO, F.H.G.; OLIVEIRA FILHO, J.E.; CORREA, M.M. Determinação de precipitação provável mensal para o município de Goiana-PE. *Revista Geama*, v. 5, n. 1, p. 41-46, 2019.

SILVA, J.R.; COELHO, P.J.; CASER, D.V.; BUENO, C.R.F.; BINI, D.L.C.; PINATTI, E.; CASTANHO FILHO, E.P. Valor da produção agropecuária do Estado de São Paulo: resultado final 2016. *Análises e Indicadores do Agronegócio*, v. 12, n. 4, 2017.

SILVESTRE, N.G.; VIEIRA, G.H.S.; NASCIMENTO, D.P. Estimativa da melhor época de plantio e produtividade de cana-de-açúcar com o modelo agrometeorológico AquaCrop. *IFES Ciência*, v. 5, n. 1, p. 197-207, 2019.

SILVESTRE, N.G.; VIEIRA, G.H.S.; ROSADO, T.L.; POLONI, C.M.M.; PETERLE, G.; KRAUSE, M.R. Produção de milho estimada pelo software AquaCrop e obtida pela cultura sob diferentes lâminas de irrigação. *Irriga*, [s.l.], v. 24, n. 3, p. 552-568, 27 set. 2019. *Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA*. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2019v24n3p552-568>.



SIMÕES, W.L.; CALGARO, M.; GUIMARÃES, M.J.M.; OLIVEIRA, A.R.; PINHEIRO, M.P.M.A. Sugarcane crops with controlled water deficit in the sub-middle São Francisco Valley, Brazil. **Revista Caatinga**, [s.l.], v. 31, n. 4, p.963-971, dez. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252018v31n419rc>.

SORENSEN, M.L. (ed.) **Agricultural water management trends**. New York: Nova Science Publishers, 2008. ISBN 978-60692-455-6

SOUZA J.L.M, JERSZURKI D., DAMAZIO E.C. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 7, p.693-702, 2013.

SOUZA, D.O.; OLIVEIRA, F.G.; CASTRO, I.L.; SOARES, J.B.S.; REIS, M.M.; FIGUEIREDO, F.P. Frequência de ocorrência de precipitação pluviométrica em Montes Claros-MG. **Agrarian**, v. 11, n. 42, p. 337-342, 2018. Universidade Federal de Grande Dourados. <http://dx.doi.org/10.30612/agrarian.v11i42.4175>.

SOUZA, I.A.; GALVANI, E. Clima e produtividade da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Campo Mourão, PR, sul do Brasil. Coimbra, Portugal, **In: VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física e II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física**, 2010.

SOUZA, J. L. M. Programa MORETTI – Módulo: Distribuição de frequência, teste de aderência e cálculo de valores prováveis, Versão 2.0, 2005(b). Curitiba: UFPR/SCA/DSEA. 2006.

SOUZA, J.L.M **Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados**: aplicado às ciências agrárias. Curitiba, Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2018. (Manual didático)

SOUZA, J.L.M, JERSZURKI D.; BARROCA, M.V.; TRENTIN, C.V.; GURSKI, B.C. Precipitação e evapotranspiração de referência prováveis para o município de Pinhais-PR. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s.l.], v. 13, n. 4, p. 3512-3523, 25 mar. 2020. INOVAGRI. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v13n4001031>.

SOUZA, J.L.M. **Ciclo da água na agricultura**: fundamentos para o estudo do sistema solo-planta-atmosfera. Curitiba: Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2017. (Manual didático)

SOUZA, J.L.M. PLATAFORMA MORETTI – Módulo: Distribuição de frequência, teste de aderência e cálculo de valores prováveis, Versão 2.0, 2005(b). Curitiba: UFPR/SCA/DSEA. 2006.

SOUZA, J.L.M.; GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, n. 2, p. 153-163, 2008.

SOUZA, J.L.M.; JERSZURKI, D.; SCHAFER, R.F.; GURSKI, B.C.; SCHAFER, H. Balanço hídrico climatológico: precipitação e evapotranspiração de referência estimadas com metodologia alternativa. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, n. 13, p. 284-298, 2017.

SOUZA, J.L.M.; JERSZURKI, D.; SIGUIFRID, G. Precipitação e evapotranspiração de referência prováveis na região de Ponta Grossa-PR. **Irriga**, v. 19, n. 2, p. 279-291, 2014a.

SOUZA, J.M.; PEREIRA, L.R.; RAFAEL, A.M.; SILVA, L.D.; REIS, E.F.; BONOMO, R. Comparison of methods for estimating reference evapotranspiration in two locations of Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 8, n. 2, p.114-126, 2014b.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: concepts and underlying principles: concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>.

TEIXEIRA, A.H.C.; LEIVAS, J.F.; RONQUIM, C.C.; VICTORIA, D.C. Sugarcane Water Productivity Assessments in the São Paulo state, Brazil. **International Journal of Remote Sensing Applications**, [s.l.], v. 6, p. 84-95, 2016.

TEIXEIRA, A.H.C.; LEIVAS, J.F.; SILVA, G.B.S. Índices de seca para o Estado de São Paulo através do uso conjunto de imagens MODIS e estações climáticas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. Anais... Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017.

THOMAS, A. Agricultural water balance of Yunnan Province, PR China: agroclimatic zoning with a Geographical Information System. **Agricultural Water Management**, v. 21, n. 4, p. 249-263, 1992. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3774\(92\)90049-3](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3774(92)90049-3).

TRY, S.; TANAKA, S.; TANAKA, K.; SAYAMA, T.; OEURN, C.; UK, S.; TAKARA, K.; HU, M.; HAN, D. Comparison of gridded precipitation datasets for rainfall-runoff and inundation modeling in the Mekong River Basin. **Plos One**, v. 15, n. 1, p. 1-13, 2020. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0226814>.

ÚNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Área cultivada com cana-de-açúcar - Estado de São Paulo. São Paulo: 2018. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-area-inep.php>> Acesso em: 10 set 2018.

VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; HENG, L.K.; VILA, M.C.; MORENO, P.M. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 351-360, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>.

VERGNI, L.; TODISCO, F.; LENA, B.; MANNOCCHI, F. Bivariate analysis of drought duration and severity for irrigation planning. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 229, p. 105926-105937, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105926>.

VIEIRA, F.R.; THEBALDI, M.S.; SILVEIRA, B.; NOGUEIRA, V.H.B. Probable rainfall of Divinópolis city, Minas Gerais State, Brazil. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 28, n. 1, p. 89-99, 2020.

VIEIRA, M.L.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 31, n. 6, p. 1271-1280, dez. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832007000600006>.

VLČEK, O.; HUTH, R. Is daily precipitation Gamma-distributed? **Atmospheric Research**, v. 93, n. 4, p. 759-766, ago. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.03.005>.

WALLER, P.; YITAYEW, M. **Irrigation and Drainage Engineering**. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. 747 p.

WANG, Z.; XIE, P.; LAI, C.; CHEN, X.; WU, X.; ZENG, Z.; LI, J. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and contributing climatic factors in China during 1961–2013. **Journal of Hydrology**, v. 544, p.97-108, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.021>.

WITELSKI, T.; BOWEN, M. **Methods of Mathematical Modelling**. Springer Undergraduate Mathematics Series, p. 1-309, 2015. Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-23042-9>.

WOLF, F.L. **Elements of probability and statistics**. New York: Mcgraw-hill Book Company, 1962.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**. v.36, p.2644–2659, 2016.

YAGUCHI, S.M. Simulação em alta resolução do ciclo diurno da precipitação em região de topografia complexa. 2013. 126 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.



## APÊNDICE 1 – PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE MELHOR AJUSTE

Por ser um apêndice muito grande, os parâmetros dos testes de aderência das análises realizadas foram armazenados e tem a sua saída em uma planilha eletrônica automática. A planilha foi idealizada e estruturada nas atividades da Plataforma Moretti, e desenvolvida no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA) / Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Paraná (FIGURA A1.1).

FIGURA A1.1 – MÓDULO DA PLATAFORMA MORETTI PARA O CÁLCULO DO VALOR PROVÁVEL DECENDIAL DAS COMPONENTES HÍDRICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA O ESTADO DE SÃO PAULO: a) PLANILHA ABERTURA; E, b) PLANILHA PARA SAÍDA DOS PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE, OBTIDOS PARA AS COMPONENTES HÍDRICAS ( $P$ ,  $ET_o$ ,  $ET_c$ ,  $Arm$ ,  $ET_r$ ,  $Def$  ou  $Exc$ ), E CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA, EM DETERMINADA LOCALIDADE NO ESTADO DE SÃO PAULO (COORDENADAS: LATITUDE x LONGITUDE)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ / SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA

**UFPR** **M** Plataforma Moretti  
LAMOSA - LABORATÓRIO DE MODELAGEM DE SISTEMAS AGRÍCOLAS

**PLATAFORMA MORETTI: MÓDULO - VALOR PROVÁVEL DECENDIAL DAS COMPONENTES HÍDRICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA O ESTADO DE SÃO PAULO.**

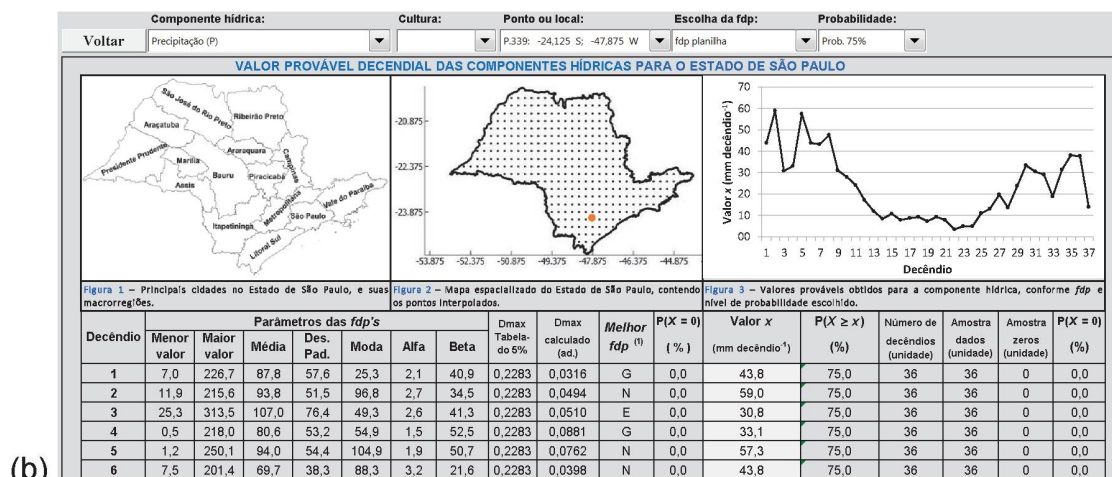
**Autores:**  
Orientador: Jorge Luiz Moretti de Souza (LAMOSA / DSEA / SCA / UFPR)  
Pós-Graduanda: Yohanne Larissa Rita (Pós-Graduação em Ciência do Solo / DSEA / SCA / UFPR)  
Co-Orientador: Alexandre Cândido Xavier (DER / UFES)

**Endereço:**  
Rua dos Funcionários, 1540 - Curitiba, PR  
CEP: 80035-050 Telefone: (041) 3350-5689  
e-mail: [jmoretti@ufpr.br](mailto:jmoretti@ufpr.br)  
Site: <http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/>

**Entrar** **Fechar**

Versão 1.0 / 2020  
Rita\_PPGCS\_2020

(a)



(b)

FONTE: A autora (2020).

Conforme as opções (ponto ou local e componente hídrica), a planilha automática realiza a saída dos parâmetros das funções densidade de probabilidade de, bem como indica a *fdp* que melhor se ajustou aos valores prováveis de precipitação pluviométrica (*P*), evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*), evapotranspiração da cultura (*ET<sub>c</sub>*), armazenamento de água no solo na zona da raiz (*Arm*), evapotranspiração real (*ET<sub>r</sub>*), deficiência hídrica (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) (FIGURA A1.1).

Para cada ponto ou local do *grid* 0,25° x 0,25° do Estado de São Paulo, a planilha automática também calcula os valores prováveis para a opção do nível probabilidade variando entre 1 a 99% (FIGURA A1.1). A planilha está disponível na Plataforma Moretti, no endereço:

[http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes.htm#6\\_0supervisao\\_pd](http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes.htm#6_0supervisao_pd)

Os principais dados de saída do apêndice são os seguintes: Menor valor; Maior valor; Média; Desvio padrão; Moda; Parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ ; *D<sub>max</sub>* tabelado a 5%; *D<sub>max</sub>* calculado; Melhor *fdp*;  $P(x = 0)$ ; Valor *x* em mm decêndio<sup>-1</sup>; Probabilidade; Número de decêndios; Tamanho da amostra; e, Amostra de zeros (FIGURA A1.1). Na FIGURA A1.2 tem uma pequena vista da “planilha banco de dados” onde estão armazenados todos os parâmetros obtidos nas análises com os testes de aderência com as *fdp*’s testadas.

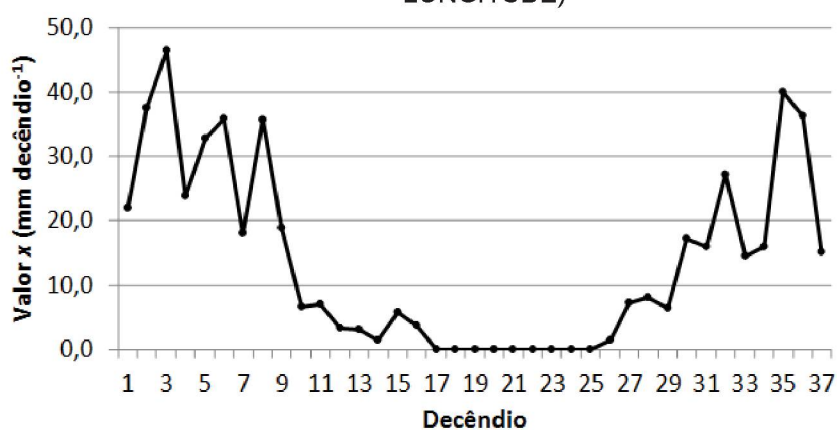
FIGURA A1.2 – “PLANILHA BANCO DE DADOS” PARA ARMAZENAMENTO DOS PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE OBTIDOS PARA AS COMPONENTES HÍDRICAS (*P*, *ET<sub>o</sub>*, *ET<sub>c</sub>*, *Arm*, *ET<sub>r</sub>*, *Def* ou *Exc*), EM DIFERENTES PROBABILIDADES DE OCORRÊNCIA (1 A 99 %), EM DETERMINADA LOCALIDADE NO ESTADO DE SÃO PAULO (COORDENADAS: LATITUDE x LONGITUDE)

Decêndio	Menor valor	Maior valor	Média	Des. Pad.	Moda	Parâmetros		Dmax Tab. 5%	Dmax Calculado	Melhor <i>f<sub>dp</sub></i> (%)	P( <i>X</i> = 0) (%)	Valor <i>x</i> (unidade)	P( <i>X</i> > <i>x</i> ) (%)	Número de Decêndios	Tamanho Amostra	Amostr. Zeros
						Alfa	Beta									
Ponto:	1	Componente hídrica: Precipitação (P)								Ponto 1 lat-19,875 lon-50,125						
1	17.8	204.5	91.7	51.1	64.5	3.1	29.2	0.2283	0.0456	G	0.0	53.7	75.0	36	36	0
2	11.0	213.6	86.4	53.4	61.6	2.4	36.6	0.2283	0.0330	G	0.0	45.1	75.0	36	36	0
3	7.1	205.0	92.5	53.9	89.5	2.4	38.9	0.2283	0.0419	N	0.0	56.1	75.0	36	36	0

FONTE: A autora (2020).

Para gerar o gráfico que faz a saída dos valores prováveis obtidos para a componente hídrica, conforme *fdp* e nível de probabilidade, o usuário deve escolher a componente hídrica (*P*, *ETo*, *Arm*, *ETc*, *Def*, *ETr* e *Exc*), localidade no Estado de São Paulo (coordenadas latitude x longitude), função densidade de probabilidade (*fdp* de melhor ajuste em cada decêndio ou escolha de uma *fdp* específica para os decêndios) e probabilidade de ocorrência (1 a 99%) (FIGURA A1.3).

FIGURA A.1.3 – GRÁFICO PARA A SAÍDA DOS VALORES PROVÁVEIS OBTIDOS PARA AS COMPONENTES HÍDRICAS (*P*, *ETo*, *ETc*, *Arm*, *ETr*, *Def* ou *Exc*), CONFORME FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE E PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA ESCOLHIDA (1 A 99%), EM DETERMINADA LOCALIDADE NO ESTADO DE SÃO PAULO (COORDENADAS: LATITUDE x LONGITUDE)



FONTE: A autora (2020).



## APÊNDICE 2 – PARÂMETROS FÍSICO-HÍDRICOS DOS SOLOS DO ESTADO DE SÃO PAULO

TABELA A2.1 – PARÂMETROS FÍSICO-HÍDRICOS DOS SOLOS DO ESTADO DE SÃO PAULO, UTILIZADOS COMO ENTRADA NO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA.

Solo	Textura	Camada	$\theta_{FMP}^{(1)}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_{cc}^{(2)}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s^{(3)}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$K_{sat}^{(4)}$ (cm dia <sup>-1</sup> )
Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico abrupto arênico	areia franca	0-7	0,08	0,17	0,50	903,00
	areia franca	7-29	0,03	0,20	0,40	774,86
	areia franca	29-61	0,02	0,17	0,34	709,00
Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico abrupto espessarênico 1	areia franca	0-13	0,10	0,18	0,46	903,00
	areia franca	13-34	0,05	0,14	0,39	693,96
	areia	34-95	0,02	0,15	0,33	709,00
	franco argilo-arenosa	95-135	0,19	0,33	0,43	212,00
Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico abrupto espessarênico 2	areia	0-13	0,12	0,19	0,49	782,00
	areia franca	13-40	0,02	0,16	0,35	522,32
	areia	40-140	0,03	0,12	0,30	530,00
Argissolo Vermelho-Amarelo Tb Eutrófico epidistrófico A moderado 1	franco argilo-arenosa	0-15	0,20	0,30	0,35	57,60
	franco argilo-arenosa	15-30	0,18	0,28	0,31	81,60
	franco argilo-arenosa	30-50	0,19	0,28	0,33	84,00
Argissolo Vermelho-Amarelo Tb Eutrófico epidistrófico A moderado 2	areia	0-15	0,03	0,06	0,36	247,20
	areia	15-30	0,02	0,05	0,31	247,20
	areia franca	30-50	0,05	0,12	0,33	232,80
Argissolo Vermelho-Amarelo Tb Eutrófico epidistrófico A moderado 3	franco arenoso	0-15	0,09	0,13	0,36	103,20
	franco argilo-arenosa	15-30	0,09	0,13	0,36	52,80
	argila arenosa	30-50	0,17	0,20	0,40	123,60
Cambissolo Háptico Aluminico típico	franco argilo-arenosa	0-12	0,18	0,347	0,637	226,00
	argila	12-19	0,20	0,356	0,51	207,00
	argila	19-72	0,235	0,388	0,532	106,00
Cambissolo Háptico Tb Distrófico léptico	franco argilo-arenosa	0-8	0,199	0,413	0,582	15,00
	franco argilo-arenosa	8-43	0,177	0,426	0,488	13,90
	argila	43-77	0,211	0,425	0,505	11,70
Latossolo Vermelho Distroférico típico 1	argila	0-3	0,202	0,284	0,71	554,00
	argila	4-13	0,198	0,273	0,72	268,75
	argila	14-28	0,301	0,36	0,601	107,40
Latossolo Vermelho Distroférico típico 2	argila	0-3	0,297	0,372	0,57	319,53
	argila	4-13	0,259	0,332	0,59	140,08
	argila	14-28	0,254	0,318	0,63	54,74
Latossolo Vermelho Distrófico típico 1	franco arenoso	0-25	0,08	0,172	0,483	162,00
	franco argilo-arenosa	25-56	0,089	0,176	0,442	191,00
	franco argilo-arenosa	56-94	0,091	0,193	0,437	459,00
Latossolo Vermelho Distrófico típico 2	franco arenoso	0-14	0,081	0,166	0,433	191,00
	franco argilo-arenosa	14-32	0,086	0,19	0,431	459,00
	franco argilo-arenosa	32-86	0,09	0,185	0,411	445,00
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico	franco argilo-arenosa	0-20	0,099	0,165	0,505	217,00
	franco argilo-arenosa	20-60	0,075	0,167	0,447	274,00

	franco argilo-arenosa	60-87	0,087	0,196	0,428	318,00
Nitossolo	argila	0-15	0,27	0,35	0,49	14,79
	argila	15-30	0,30	0,43	0,52	16,48
	argila	30-45	0,29	0,44	0,52	16,05
	argila	45-60	0,30	0,41	0,52	16,54

<sup>(1)</sup>  $\theta_{PMP}$  – Umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente, obtida na tensão de 1,5 MPa;

<sup>(2)</sup>  $\theta_{CC}$  – Umidade volumétrica do solo na capacidade de campo, obtida na tensão de 0,01 MPa; <sup>(3)</sup>  $\theta_S$  – Umidade volumétrica do solo na saturação; <sup>(4)</sup>  $K_{sat}$  – Condutividade hidráulica saturada do solo.

FONTE: Adaptado de Ottoni (2018), Pilatti (2018), Sartori (2010) e Vieira & Klein (2007).

### APÊNDICE 3 – FREQUÊNCIA DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE MELHOR AJUSTE PARA AS COMPONENTES HÍDRICAS DE SAÍDA DO AQUACROP, PARA O ESTADO DE SÃO PAULO.

TABELA A3.1 – FREQUÊNCIA DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE (E – EXPONENCIAL; G – GAMA; N – NORMAL; T – TRIANGULAR; U – UNIFORME) DE MELHOR AJUSTE PARA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA ( $ET_c$ ), PARA O ESTADO DE SÃO PAULO.

Decêndios	----- Frequência da $f_{dp}$ de melhor ajuste para $ET_c$ -----				
	E	G	N	T	U
1 (01/01 a 10/01)	0	153	186	10	17
2 (11/01 a 20/01)	0	19	287	56	4
3 (21/01 a 30/01)	0	57	270	31	8
4 (31/02 a 09/02)	0	4	300	59	3
5 (10/02 a 19/02)	0	28	291	45	2
6 (20/02 a 01/03)	2	80	251	23	10
7 (02/03 a 11/03)	6	115	205	23	17
8 (12/03 a 21/03)	21	215	104	15	11
9 (22/03 a 31/03)	42	129	182	10	3
10 (01/04 a 10/04)	48	158	139	14	7
11 (11/04 a 20/04)	37	209	100	17	3
12 (21/04 a 30/04)	57	202	85	15	7
13 (01/05 a 10/05)	84	220	49	11	2
14 (11/05 a 20/05)	104	247	11	4	0
15 (21/05 a 30/05)	94	241	26	5	0
16 (31/05 a 09/06)	92	239	32	3	0
17 (10/06 a 19/06)	77	256	25	8	0
18 (20/06 a 29/06)	93	218	35	16	4
19 (30/06 a 09/07)	107	215	30	14	0
20 (10/07 a 19/07)	102	220	32	10	2
21 (20/07 a 29/07)	145	195	18	7	1
22 (30/07 a 08/08)	82	242	23	19	0
23 (09/08 a 18/08)	114	246	5	1	0
24 (19/08 a 28/08)	103	223	22	16	2
25 (29/08 a 07/09)	145	207	11	3	0
26 (08/09 a 17/09)	96	190	49	29	2
27 (18/09 a 27/09)	53	247	39	22	5
28 (28/09 a 07/10)	39	211	103	9	4
29 (08/10 a 17/10)	46	242	62	11	5
30 (18/10 a 27/10)	37	204	103	15	7
31 (28/10 a 06/11)	38	189	112	14	13
32 (07/11 a 16/11)	35	172	130	16	13
33 (17/11 a 26/11)	39	203	103	19	2
34 (27/11 a 06/12)	26	230	92	15	3
35 (07/12 a 16/12)	35	189	111	18	13
36 (17/12 a 26/12)	42	233	76	9	6
37 (27/12 a 31/12)	24	271	61	10	0
Soma	2065	6919	3760	622	176
Porcentagem (%)	15,24	51,09	27,76	4,59	1,29

FONTE: A autora (2020).



TABELA A3.2 – FREQUÊNCIA DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE (E – EXPONENCIAL; G – GAMA; N – NORMAL; T – TRIANGULAR; U – UNIFORME) DE MELHOR AJUSTE PARA ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NA ZONA DA RAIZ (*Arm*), PARA O ESTADO DE SÃO PAULO.

Decêndios	----- Frequência da <i>fdp</i> de melhor ajuste para o <i>Arm</i> -----				
	E	G	N	T	U
1 (01/01 a 10/01)	51	274	28	13	0
2 (11/01 a 20/01)	80	246	27	9	4
3 (21/01 a 30/01)	134	192	35	5	0
4 (31/02 a 09/02)	79	237	41	6	3
5 (10/02 a 19/02)	53	255	50	6	2
6 (20/02 a 01/03)	78	116	127	33	12
7 (02/03 a 11/03)	106	121	114	12	13
8 (12/03 a 21/03)	72	81	158	30	25
9 (22/03 a 31/03)	77	104	127	38	20
10 (01/04 a 10/04)	81	128	124	16	17
11 (11/04 a 20/04)	76	116	126	22	26
12 (21/04 a 30/04)	70	118	136	15	27
13 (01/05 a 10/05)	66	129	130	23	18
14 (11/05 a 20/05)	82	106	137	20	21
15 (21/05 a 30/05)	36	71	191	22	46
16 (31/05 a 09/06)	38	97	191	19	21
17 (10/06 a 19/06)	59	79	156	29	43
18 (20/06 a 29/06)	70	88	151	17	40
19 (30/06 a 09/07)	64	91	158	19	34
20 (10/07 a 19/07)	56	86	167	21	36
21 (20/07 a 29/07)	63	93	164	12	34
22 (30/07 a 08/08)	70	100	145	23	28
23 (09/08 a 18/08)	63	157	122	14	10
24 (19/08 a 28/08)	72	151	116	13	14
25 (29/08 a 07/09)	107	130	100	13	16
26 (08/09 a 17/09)	117	124	99	12	14
27 (18/09 a 27/09)	72	122	106	14	52
28 (28/09 a 07/10)	65	119	137	19	26
29 (08/10 a 17/10)	68	115	139	23	21
30 (18/10 a 27/10)	41	107	163	19	36
31 (28/10 a 06/11)	39	90	189	24	24
32 (07/11 a 16/11)	26	80	201	14	45
33 (17/11 a 26/11)	53	91	166	26	30
34 (27/11 a 06/12)	52	115	152	30	17
35 (07/12 a 16/12)	29	83	195	17	42
36 (17/12 a 26/12)	42	91	152	19	62
37 (27/12 a 31/12)	28	104	184	16	34
Soma	2435	4607	4904	683	913
Porcentagem (%)	17,98	34,02	36,21	5,04	6,74

FONTE: A autora (2020).

TABELA A3.3 – FREQUÊNCIA DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE (E – EXPONENCIAL; G – GAMA; N – NORMAL; T – TRIANGULAR; U – UNIFORME) DE MELHOR AJUSTE PARA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REAL ( $ET_r$ ), PARA O ESTADO DE SÃO PAULO.

Decêndios	----- Frequência da $f_{dp}$ de melhor ajuste para $ET_r$ -----				
	E	G	N	T	U
1 (01/01 a 10/01)	0	140	195	15	16
2 (11/01 a 20/01)	0	16	294	50	6
3 (21/01 a 30/01)	0	77	266	17	6
4 (31/02 a 09/02)	0	5	314	44	3
5 (10/02 a 19/02)	0	28	293	42	3
6 (20/02 a 01/03)	3	71	246	33	13
7 (02/03 a 11/03)	5	110	213	17	21
8 (12/03 a 21/03)	28	216	95	14	13
9 (22/03 a 31/03)	42	137	176	9	2
10 (01/04 a 10/04)	49	166	135	10	6
11 (11/04 a 20/04)	33	209	104	17	3
12 (21/04 a 30/04)	63	187	98	13	5
13 (01/05 a 10/05)	84	222	49	10	1
14 (11/05 a 20/05)	114	233	16	3	0
15 (21/05 a 30/05)	97	233	28	7	1
16 (31/05 a 09/06)	77	249	32	8	0
17 (10/06 a 19/06)	64	262	32	7	1
18 (20/06 a 29/06)	99	219	32	14	2
19 (30/06 a 09/07)	77	241	34	12	2
20 (10/07 a 19/07)	87	234	37	7	1
21 (20/07 a 29/07)	139	201	20	6	0
22 (30/07 a 08/08)	89	223	34	18	2
23 (09/08 a 18/08)	135	224	3	4	0
24 (19/08 a 28/08)	100	221	26	17	2
25 (29/08 a 07/09)	147	202	12	5	0
26 (08/09 a 17/09)	83	188	63	31	1
27 (18/09 a 27/09)	56	261	23	21	5
28 (28/09 a 07/10)	49	220	85	8	4
29 (08/10 a 17/10)	53	237	53	16	7
30 (18/10 a 27/10)	32	210	98	19	7
31 (28/10 a 06/11)	34	199	108	16	9
32 (07/11 a 16/11)	37	172	130	15	12
33 (17/11 a 26/11)	28	211	112	12	3
34 (27/11 a 06/12)	26	234	88	16	2
35 (07/12 a 16/12)	34	201	106	11	14
36 (17/12 a 26/12)	37	236	71	12	10
37 (27/12 a 31/12)	13	288	43	21	1
Soma	2014	6983	3764	597	184
Porcentagem (%)	14,87	51,56	27,79	4,40	1,35

FONTE: A autora (2020).

TABELA A3.4 – FREQUÊNCIA DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE (E – EXPONENCIAL; G – GAMA; N – NORMAL; T – TRIANGULAR; U – UNIFORME) DE MELHOR AJUSTE PARA DEFICIÊNCIA HÍDRICA (*Def*), PARA O ESTADO DE SÃO PAULO.

Decêndios	----- Frequência da <i>f<sub>dp</sub></i> de melhor ajuste para <i>Def</i> -----				
	E	G	N	T	U
1 (01/01 a 10/01)	42	181	125	13	5
2 (11/01 a 20/01)	27	104	201	20	14
3 (21/01 a 30/01)	22	147	168	17	12
4 (31/02 a 09/02)	32	108	189	16	21
5 (10/02 a 19/02)	34	125	171	22	14
6 (20/02 a 01/03)	32	107	199	16	12
7 (02/03 a 11/03)	47	179	111	25	4
8 (12/03 a 21/03)	34	175	134	20	3
9 (22/03 a 31/03)	37	141	156	20	12
10 (01/04 a 10/04)	77	151	110	21	7
11 (11/04 a 20/04)	79	108	131	34	14
12 (21/04 a 30/04)	166	144	42	12	2
13 (01/05 a 10/05)	217	130	14	4	1
14 (11/05 a 20/05)	221	116	15	13	1
15 (21/05 a 30/05)	168	162	24	12	0
16 (31/05 a 09/06)	135	223	6	2	0
17 (10/06 a 19/06)	104	252	6	4	0
18 (20/06 a 29/06)	111	223	25	5	2
19 (30/06 a 09/07)	111	254	1	0	0
20 (10/07 a 19/07)	157	191	14	0	4
21 (20/07 a 29/07)	140	205	11	7	3
22 (30/07 a 08/08)	51	310	5	0	0
23 (09/08 a 18/08)	40	322	4	0	0
24 (19/08 a 28/08)	78	283	5	0	0
25 (29/08 a 07/09)	122	238	3	3	0
26 (08/09 a 17/09)	245	94	14	12	1
27 (18/09 a 27/09)	165	133	53	13	2
28 (28/09 a 07/10)	81	146	102	31	6
29 (08/10 a 17/10)	116	192	43	14	1
30 (18/10 a 27/10)	38	121	159	32	16
31 (28/10 a 06/11)	64	162	126	14	0
32 (07/11 a 16/11)	29	166	153	9	9
33 (17/11 a 26/11)	36	171	136	17	6
34 (27/11 a 06/12)	35	144	150	22	15
35 (07/12 a 16/12)	28	146	171	16	5
36 (17/12 a 26/12)	24	146	174	13	9
37 (27/12 a 31/12)	61	183	96	19	7
Soma	3206	6383	3247	498	208
Porcentagem (%)	23,67	47,13	23,97	3,67	1,53

FONTE: A autora (2020).



TABELA A3.5 – FREQUÊNCIA DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE (E – EXPONENCIAL; G – GAMA; N – NORMAL; T – TRIANGULAR; U – UNIFORME) DE MELHOR AJUSTE PARA EXCEDENTE HÍDRICO (*Exc*), PARA O ESTADO DE SÃO PAULO.

Decêndios	----- Frequência da <i>fdp</i> de melhor ajuste para <i>Exc</i> -----				
	E	G	N	T	U
1 (01/01 a 10/01)	166	186	12	2	0
2 (11/01 a 20/01)	122	162	61	18	3
3 (21/01 a 30/01)	129	191	32	14	0
4 (31/02 a 09/02)	111	230	23	2	0
5 (10/02 a 19/02)	91	194	70	10	1
6 (20/02 a 01/03)	91	197	66	11	1
7 (02/03 a 11/03)	142	182	41	1	0
8 (12/03 a 21/03)	94	195	60	16	1
9 (22/03 a 31/03)	114	167	66	17	2
10 (01/04 a 10/04)	169	174	17	6	0
11 (11/04 a 20/04)	123	128	81	30	4
12 (21/04 a 30/04)	155	185	21	5	0
13 (01/05 a 10/05)	189	143	28	5	1
14 (11/05 a 20/05)	182	155	26	3	0
15 (21/05 a 30/05)	130	198	16	16	6
16 (31/05 a 09/06)	100	259	7	0	0
17 (10/06 a 19/06)	170	186	8	2	0
18 (20/06 a 29/06)	84	280	2	0	0
19 (30/06 a 09/07)	110	247	9	0	0
20 (10/07 a 19/07)	157	177	22	8	2
21 (20/07 a 29/07)	145	203	18	0	0
22 (30/07 a 08/08)	63	294	9	0	0
23 (09/08 a 18/08)	89	259	14	1	3
24 (19/08 a 28/08)	145	217	3	0	1
25 (29/08 a 07/09)	189	144	31	2	0
26 (08/09 a 17/09)	220	121	19	5	1
27 (18/09 a 27/09)	182	158	15	10	1
28 (28/09 a 07/10)	147	183	30	6	0
29 (08/10 a 17/10)	151	207	6	2	0
30 (18/10 a 27/10)	58	199	87	19	3
31 (28/10 a 06/11)	136	186	39	4	1
32 (07/11 a 16/11)	48	177	120	19	2
33 (17/11 a 26/11)	119	169	68	10	0
34 (27/11 a 06/12)	106	195	41	23	1
35 (07/12 a 16/12)	11	196	122	30	7
36 (17/12 a 26/12)	25	176	131	25	9
37 (27/12 a 31/12)	132	190	25	19	0
Soma	4595	7110	1446	341	50
Porcentagem (%)	33,93	52,50	10,67	2,51	0,36

FONTE: A autora (2020).